



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

AMPÉRMETR S VELKÝM ROZLIŠENÍM

HIGH RESOLUTION AMMETER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Honek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Marek Honek

ID: 191847

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Ampérmetr s velkým rozlišením

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou citlivého měření velkých proudů (řádově jednotky A s rozlišením v μA). Vytvořte rešerši z oblasti technik a metodiky elektronického měření proudu, zaměřte se na metody pro provozní testy s vysokým rozlišením, opakovatelností a reprodukovatelností měření. Na základě získaných znalostí vytvořte návrh (tj. schéma, desky plošných spojů) ampérmetru s velkým rozlišením a jeho funkčnost otestujte simulací. Navržený přístroj prakticky realizujte. Ve spolupráci s Thermo Fisher Scientific Brno otestujte navržené řešení v simulovaných a reálných podmínkách. Vhodným způsobem diskutujte získané výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Low Level Measurements Handbook [online]. 7th Edition. USA: Tektronix, 2016 [cit. 2018-06-12]. ISBN 1KW-1559-0 / No. 1559. Dostupné z: <https://www.tek.com/document/handbook/low-level-measurements-handbook>

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 23.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Transmisní elektronový mikroskop je zařízení pracující na podobném principu jako optický mikroskop. Pro dosažení obrovských zvětšení využívá faktu, že elektrony mají mnohem kratší vlnovou délku než fotony. Pro zaostření světla se používají skleněné čočky, které jsou v elektronovém mikroskopu nahrazeny cívkami generujícími magnetické pole. To je přímo úměrné velikosti proudu, který těmito cívkami prochází.

Pro dosažení vysokého rozlišení je nezbytné, aby proud dodávaný do cívek byl co možná nejstabilnější. Tato práce rozebírá metody měření proudu a snaží se o návrh zařízení pro měření stability proudu s rozlišením 1 ppm.

Klíčová slova

Měření proudu, vysoké rozlišení, zesilovač, bočník, teplotní stabilizace

Abstract

A transmission electron microscope is a device operating on a similar principle as an optical microscope. The fact that electrons wavelength is much shorter than the wavelength of photons is used to obtain huge magnifications. Glass lenses commonly used in the optical microscope are therefore replaced by magnetic coils in the electron microscopes. A magnetic field is directly proportional to the current passing through these coils.

It is important to the current supplied to the coils to be as stable as possible to achieve high resolution. The goal of this thesis is to analyze usable current measurement methods and to design a current stable measuring device with a resolution of 1 ppm.

Keywords

Current measurement, high resolution, amplifier, shunt, temperature stabilization

Bibliografická citace:

HONEK, Marek. Ampérmetr s velkým rozlišením [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118411>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Miloslav Steinbauer.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Ampérmetr s velkým rozlišením jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. května 2019

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Miloslavu Steinbauerovi, Ph.D. za pomoc při zpracování této práce.

Dále děkuji firmě Thermo Fisher Scientific za poskytnutí zajímavého tématu, odborného i formálního vedení a možnost zpracovávat tuhle práci.

V Brně dne: 22. května 2019

.....

podpis autora

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Přesnost měření a nejistota.....	12
2.1 Odchylky.....	12
2.2 Standardní nejistoty	14
3. Měření proudu.....	16
3.1 Nepřímé měření proudu	16
3.2 Přímé měření proudu	16
3.2.1 Převodník I/U	16
3.2.2 Bočník.....	17
3.2.2.1 Měření na nízké straně.....	17
3.2.2.2 Měření na vysoké straně	17
4. Operační zesilovače	18
4.1 Zapojení	19
4.1.1 Rozdílový zesilovač.....	19
4.1.2 Přístrojový zesilovač	20
4.2 Napájecí napětí OZ	20
4.3 Vlastnosti reálných OZ	21
4.3.1 Offsetové napětí.....	21
4.3.1.1 Automatické nulování	21
4.3.1.2 Modulační zesilovače	21
4.3.2 Potlačení souhlasného chybového napětí	22
4.3.3 Potlačení vlivu změny napájecího napětí	23
4.3.4 Vliv teploty	23
5. Měřicí rezistory pro bočník.....	24
6. Teplotní stabilizace	26
6.1 Snímání teploty	26
6.2 Peltierův článek.....	27
6.3 Regulace.....	27
7. Návrh koncepce.....	29
7.1 Přístrojový zesilovač.....	29
7.2 Modifikovaný diferenční zesilovač	29
7.3 Proudové zrcadlo	30
7.4 Výběr OZ.....	30
7.4.1 AD8676	31
7.4.2 OPA2188	31
7.5 Výběr měřicího rezistoru	31

7.6	Zpětnovazební rezistory	31
7.7	Obvodová simulace	32
7.8	Chlazení bočnicku	32
8.	Realizace a testování	33
8.1	Bočník	33
8.1.1	Zesilovač	34
8.1.2	Konektory	35
8.2	Zdroj napětí	36
8.2.1	Vstupní ochrany	36
8.3	Zemní plochy	36
8.3.1	Stabilizace napájecího napětí	37
8.3.2	Zdroj plovoucího napětí	37
8.4	Chladič	38
8.4.1	Teplotní model chladiče	38
8.5	Osazení	40
8.6	Výroba krytu	40
8.7	Elektrické měření	41
8.8	Testování v tepelné komoře	41
8.8.1	První test	42
8.8.2	Druhý test	44
8.8.3	Třetí test	44
8.9	Testování v reálných podmínkách	44
8.9.1	Úpravy pro testování v reálných podmínkách	44
8.9.2	Zhodnocení testů	45
9.	Změny a doplnění pro další vývoj	46
9.1	Teplotní stabilizace	46
9.2	Regulace napětí sekundární strany NMS1209	47
9.3	Doplnění rezistoru na desku bočnicku	47
9.4	Doplnění integračního filtru na výstup	48
10.	Závěr	49

Seznam symbolů a zkratk

Zkratky:

OZ	...	Operační zesilovač
DA	...	Diferential amplifier/diferenciální zesilovač
IA	...	Instrumentation amplifier/přístrojový zesilovač
CMV	...	Common mode voltage
CMRR	...	Common-mode rejection ratio/potlačení stejnosměrného signálu
PSRR	...	Power-supply rejection ratio/potlačení nestability napájení
TKR	...	Temperature coefficient of resistance/teplotní koeficient odporu
DPS	...	Deska plošných spojů
ADC	...	Analog-digital convertor/Analogově číslicový převodník
PWM	...	Pulse-width modulation/pulzně šířková modulace

Symbols:

U	...	napětí	(Ω)
I	...	proud	(A)
R	...	odpor	(Ω)
T	...	teplota	(K)
t	...	čas	(s)
P	...	výkon	(W)
Q	...	teplo	(J)
X _M	...	naměřená hodnota	(jednotka veličiny X)
X _p	...	konvenčně pravá hodnota	(jednotka veličiny X)
Δ _X	...	absolutní odchylka	(jednotka veličiny X)
μ	...	průměr naměřených hodnot	(jednotka veličiny X)
n	...	počet měření	(-)
X _k	...	naměřená hodnota v k-tém měření	(jednotka veličiny X)
Δ	...	zdánlivá absolutní odchylka	(jednotka veličiny X)
σ	...	směrodatná odchylka	(jednotka veličiny X)
σ ²	...	rozptyl	(jednotka veličiny X ²)
u _{AX}	...	standardní nejistota typu A	(jednotka veličiny X)
u _{BX}	...	standardní nejistota typu B	(jednotka veličiny X)
k _r	...	koeficient rozšíření	(-)
u _C	...	standardní kombinovaná nejistota	(jednotka veličiny X)

Seznam obrázků

Obr. 1: Zobrazování náhodných odchylek při opakovaném měření (převzato z [13])	13
Obr. 2: Aktivní převodník I/U [31]	17
Obr. 3: Schématická značka operačního zesilovače	18
Obr. 4: Zapojení OZ se zápornou zpětnou vazbou	19
Obr. 5: Zapojení DA	19
Obr. 6: Zapojení IA (převzato a upraveno [6])	20
Obr. 7: Principiální schéma zesilovače s automatickým nulováním (převzato z [18])	21
Obr. 8: Schéma modulačního zesilovače (převzato [16])	22
Obr. 9: Grafy napětí v časové a kmitočtové oblasti v modulačním zesilovači (převzato [16])	22
Obr. 10: Vysvětlení principu CMV	23
Obr. 11: Čtyř-vodičový rezistor [29]	25
Obr. 12: Schéma měření teploty termočlánkem převzato z [19]	26
Obr. 13: Peltierův článek [30]	27
Obr. 14: Zapojení modifikovaného DA	29
Obr. 15: Proudové zrcadlo	30
Obr. 16: Schéma bočníku	33
Obr. 17: Layout bočníku	34
Obr. 18: Schéma zapojení zdroje	36
Obr. 19: Layout zdroje	37
Obr. 20: Chladič s mezibloky (vlevo), vrtání otvorů a upravené mezibloky (vpravo)	38
Obr. 21: Parametry chladiče	39
Obr. 22: Tepelné schéma	39
Obr. 23: Kryt	41
Obr. 24: Měřicí sestava s tepelnou komorou	42
Obr. 25: Umístění NTC termistoru na měřicí odpor	42
Obr. 26: Doplněné rezistory	43
Obr. 27: Testovací systém	44

1. ÚVOD

Cílem této práce je sestrojít ampérmetr pro měření stability zdroje proudu pro cívkou elektronové optiky v transmisním elektronovém mikroskopu. Jedná se o stejnosměrné proudy do deseti ampérů. Jakákoliv změna tohoto proudu se projeví posunutím obrazu, proto je třeba měřit proud s vysokou přesností. Zejména je nutné rozeznat a zaznamenat nežádoucí časovou změnu tohoto proudu, a to v horizontu několika sekund, ale i několika desítek minut. Přesnost měření absolutní hodnoty proudu není nijak důležitá, protože proud nastavuje (zvyšuje a snižuje) obsluha mikroskopu vždy podle toho, co mikroskop zrovna zobrazuje.

Rozlišení měření proudu je požadováno na jednotky μA . Proto bude nutné celý přípravek co nejlépe odrušit, teplotně stabilizovat a zajistit pro něj velmi stabilní napájení.

Tento ampérmetr bude sloužit jako testovací nástroj pro ověřování stability zdrojů od firmy PRODRIVE, konkrétně zdrojů OLSD a OOLD používaných firmou Thermo Fisher Scientific, ve které jsem v době psaní bakalářské práce na stáži. Testovací ampérmetr navrhuji a sestrojuji ve spolupráci s R&D oddělením.

2. PŘESNOST MĚŘENÍ A NEJISTOTA

Přesnost měření vyjadřuje shodu mezi naměřenou hodnotou veličiny a konvenčně pravou hodnotou veličiny. Přesná hodnota veličiny nelze z důvodů fyzikálních limitů přesně zjistit, proto bývá nahrazována právě konvenčně pravou hodnotou, která se od pravé hodnoty liší jen zanedbatelně.

Měření každé fyzikální veličiny, a tedy i proudu, je zatíženo nejistotami měření a systematickými odchylkami.

Nejistota měření vyjadřuje rozptyl naměřených hodnot stejné veličiny. Popisuje tedy kvalitu výsledku a určuje interval, ve kterém se s určitou pravděpodobností nachází konvenčně pravá hodnota.

Absolutní odchylka jediného měření vyjadřuje rozdíl mezi naměřenou hodnotou a skutečnou, respektive konvenčně pravou hodnotou.

Přesností měření a nejistotami se zabývá norma ČSN EN 60359 „Elektrická a elektronická měřicí zařízení – Vyjadřování vlastností“.

2.1 Odchylky

Absolutní odchylka, jak je předesláno v předchozím odstavci je rozdíl mezi naměřenou hodnotou a skutečnou hodnotou, tedy:

$$\Delta_X = X_M - X_P \quad (\text{jednotka veličiny } X)$$

kde: X_M je naměřená hodnota, (jednotka veličiny X)
 X_P je konvenčně pravá hodnota. (jednotka veličiny X)

Dále je zavedena relativní odchylka měření jako podíl absolutní odchylky a naměřené hodnoty:

$$\delta_X = \frac{\Delta_X}{X_M} \quad (-)$$

kde: Δ_X je absolutní odchylka, (jednotka veličiny X)
 X_M je naměřená hodnota. (jednotka veličiny X)

Alternativně lze tuto hodnotu vyjádřit v procentech (%), promilách (‰) nebo v miliontinách (ppm). Používání jednotek ppm je v technické praxi naprosto běžné, avšak ne správné. Norma ČSN ISO 80000-1 povoluje vyjádření v mocninách deseti, tedy 10^{-6} . V této práci však budu používat běžné označení ppm, kterému všichni rozumí. [15]

Odchylka měření sestává ze dvou dílčích odchylek, kterými jsou systematická odchylka a náhodná odchylka.

Systematická odchylka se při opakovaném měření projevuje stále stejně, má stejnou velikost i znaménko. Pokud ji známe (můžeme zjistit například přesnějším měřením nebo pokud známe příčinu, tak i výpočtem) můžeme naměřenou hodnotu velmi snadno korigovat. Její velikost je dána rozdílem průměru naměřených hodnot a pravé hodnoty X_P :

$$\Delta_{\text{SYST}} = \mu - X_P \quad (\text{jednotka veličiny } X)$$

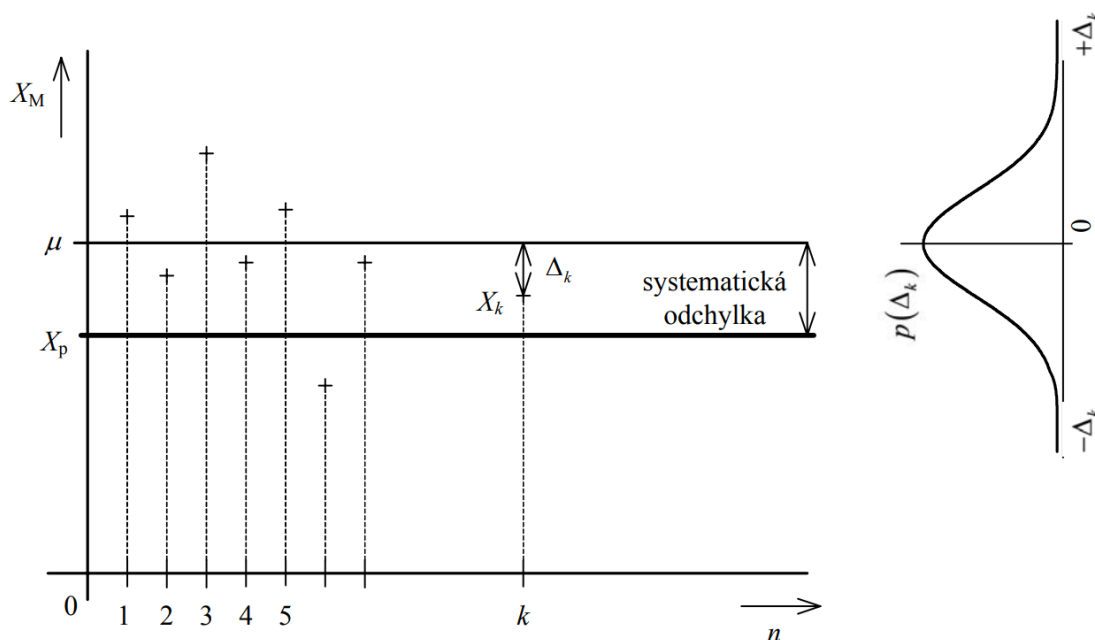
kde: μ je průměr naměřených hodnot, (jednotka veličiny X)
 X_P je konvenčně pravá hodnota. (jednotka veličiny X)

Výpočet aritmetického průměru:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k=n} X_k \quad (\text{jednotka veličiny } X)$$

kde: n je počet měření, (-)
 X_k je naměřená hodnota v k -tém měření. (jednotka veličiny X)

Náhodná odchylka se projevuje zcela náhodně, nezávisle na vůli nebo vědomí měřící osoby. Mění se její velikost i znaménko a nelze proto odstranit korekcí. Eliminace náhodné odchylky se provádí opakováním měření a následného výpočtu průměru naměřených hodnot, jak je vidět na obr. 1. S větším počtem opakování se snižuje vliv náhodné odchylky na výsledky měření.



Obr. 1: Zobrazování náhodných odchylek při opakovaném měření (převzato z [13])

Lze zavést zdánlivou absolutní odchylku, která je rozdílem k -té naměřené hodnoty a průměru naměřených hodnot:

$$\Delta_k = X_k - \mu \quad (\text{jednotka veličiny } X)$$

kde: X_k je naměřená hodnota v k -tém měření, (jednotka veličiny X)
 μ je průměr naměřených hodnot. (jednotka veličiny X)

Důležitými veličinami jsou rozptyl:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \Delta_k^2 \quad (\text{jednotka veličiny } X^2)$$

kde: n je počet měření, (-)
 Δ je zdánlivá absolutní odchylka, (jednotka veličiny X)

a směrodatná odchylka:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (\text{jednotka veličiny } X)$$

kde: σ^2 je rozptyl. (jednotka veličiny X^2)

Velikost směrodatné odchylky do určité míry vypovídá o přesnosti měření. [13]

2.2 Standardní nejistoty

Výsledky měření jsou ovlivněny odchylkami, a proto by měly být doplněny o tak zvané standardní nejistoty, které vytyčují interval hodnot kolem výsledku a popisují s jakou pravděpodobností je skutečná hodnota měřené veličiny v tomto intervalu. Jsou určovány nejistoty typu A a typu B, z nich lze spočítat kombinovanou standardní nejistotu a rozšířenou standardní nejistotu.

Standardní nejistota typu A (označována u_A) je stanovena statisticky na základě opakovaných měření. Popisuje vlastně nejistotu vzniklou náhodnými odchylkami měření a je dána výběrovou směrodatnou odchylkou rozšířenou o koeficient rozšíření.

$$u_{AX} = k_S \cdot \sqrt{\frac{1}{m(m-1)} \sum_{k=1}^m (X_k - \mu)^2} \quad (\text{jednotka veličiny } X)$$

kde: k_S je koeficient rozšíření, (-)
 m je počet měření, (-)
 X_k je měřená veličina, (jednotka veličiny X)
 μ je aritmetický průměr. (jednotka veličiny X)

Koeficient rozšíření je pro dvě měření 7 a s přibývajícími měřeními exponenciálně klesá. Od deseti měření už se považuje za 1.

Standardní nejistota typu B (označována u_B) popisuje nejistotu, která nelze určit statistickým zpracováním naměřených dat. Zahrnuje nepřesnosti měřících přístrojů, systematické odchylky, vliv teploty, odchylku nuly, změnu zesílení a podobně. Její určení probíhá rozbořem měřícího zařízení a určením jednotlivých odchylek typu B pro každý zdroj nejistot. Výsledná nejistota typu B je geometrickým součtem dílčích nejistot.

Kombinovaná standardní nejistota se určí z nejistot typu A a B:

$$u_{CX} = \sqrt{u_{AX}^2 + u_{BX}^2} \quad (\text{jednotka veličiny } X)$$

kde: u_{AX} je standardní nejistota typu A, (jednotka veličiny X)
 u_{BX} je standardní nejistota typu B. (jednotka veličiny X)

Rozšířená nejistota (označována U) je součinem kombinované standardní nejistoty a koeficientu rozšíření:

$$U = k_r \cdot u_C \quad (\text{jednotka veličiny } X)$$

kde: k_r je koeficient rozšíření, (-)
 u_C je standardní kombinovaná nejistota. (jednotka veličiny X)

Koeficient rozšíření by měl být určován pomocí stupňů volnosti výsledku a tabulek. Jeho určení je však složité, proto se používá dohodnutá hodnota 2, která při Gausově rozložení odpovídá 95% pravděpodobnosti, že v daném intervalu leží pravá hodnota měřené veličiny. [13,14,15]

3. MĚŘENÍ PROUDU

Elektrický proud lze měřit přímou i nepřímou metodou. Obě metody jsou popsány v následujících kapitolách.

3.1 Nepřímé měření proudu

Nepřímá metoda měření proudu nevyžaduje žádný zásah do obvodu, ve kterém chceme proud měřit. Je založena na Ampérově zákonu a Faradayově zákonu o elektromagnetické indukci.

Kolem vodiče, ve kterém chceme měřit proud, umístíme Rogowského cívku. Na té se indukuje napětí přímo úměrné velikosti protékajícího proudu. Tato metoda je použitelná pouze pro střídavé proudy a používá se tam, kde je vyžadováno galvanické oddělení měřeného a měřícího obvodu. Tato metoda je používána i při měření vysokých proudů (zpravidla větších než 100 A). [1]

Další možností měření proudu nepřímou metodou je měření Hallovoú sondou. Ta převádí magnetické pole indukované měřeným proudem na napětí. Tuto metodu lze použít i na měření stejnosměrných proudů.

3.2 Přímé měření proudu

Při měření proudu přímou metodou se do měřeného obvodu vloží rezistor o definované hodnotě. Při průtoku měřeného proudu rezistorem vznikne úbytek napětí, který se zesílí zesilovačem a dále zpracuje (například pomocí ADC). Z toho vyplývá, že přímá metoda měření proudu je vždy invazivní a ovlivňuje měřený systém.

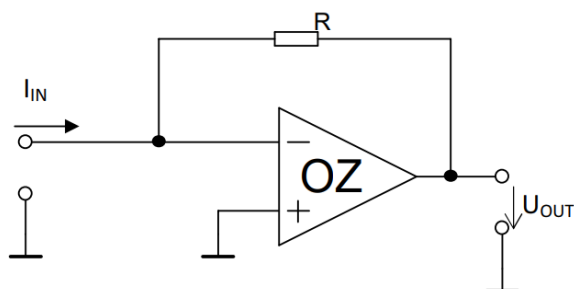
Velikost odporu se volí podle velikosti proudu, na který má být ampérmetr designován. Kdyby byla hodnota odporu příliš vysoká, docházelo by k výraznému ovlivňování měřeného systému. V opačném případě – při zvolení příliš malého odporu – by byl úbytek napětí tak malý, že by se mohl „utopit“ v šumu.

V této práci se budu dále zabývat pouze přímou metodou měření proudu. [2]

3.2.1 Převodník I/U

V obecném pojetí je převodníkem proudu na napětí i samotný odpor, který tento převod zajišťuje podle Ohmova zákona. Převodníky ale existují i důmyslnější, obsahující aktivní prvky.

Nejjednodušší zapojení aktivního převodníku I/U je znázorněno na obr. 2. Výhodou aktivních převodníků je zejména to, že jeho funkce nezáleží na impedanci zbytku obvodu na vstupní ani výstupní straně. [31]



Obr. 2: Aktivní převodník I/U [31]

Pro přesné měření velkých proudů je tento typ převodníků nevhodný, protože aktivní prvky pro velké proudy nemají dostatečné metrologické vlastnosti.

3.2.2 Bočník

Výstupem bočníku ampérmetru je napětí. To se zpravidla převede pomocí ADC na digitální slovo, které lze dále zpracovávat. V digitální formě můžeme hodnotu proudu zobrazit na displeji, zaznamenávat do paměti (například do souboru s příponou .csv).

3.2.2.1 Měření na nízké straně

Měření proudu vytékajícího ze zátěže do země (anglicky low-side sensing) má své výhody zejména v jednoduchosti zapojení. Měřicí rezistor je napojený mezi zátěž a zemnění. Potom napětí na rezistoru můžeme automaticky vztahovat vůči zemi. CMV je z podstaty zapojení velmi nízké.

Problém nastane v okamžiku, kdy zemnění má nenulový odpor. Potom je jeho odpor v sérii s měřicím rezistorem a úbytky napětí se sečtou. Měřicí systém potom detekuje větší napětí, než by odpovídalo průchodu měřeného proudu měřicím rezistorem.

Další problém tohoto zapojení nastane v případě poruchy – zkratu zátěže na zem. Přes to, že v ten okamžik ze zdroje teče zkratový proud, zátěží ani měřicím rezistorem neprotéká žádný proud a ampérmetr nedetekuje zkrat. [2,3,5,7,9,10]

3.2.2.2 Měření na vysoké straně

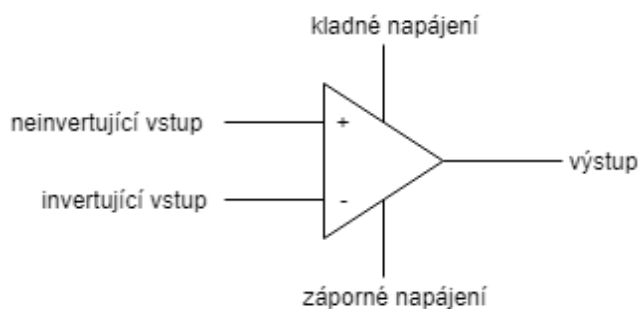
Měření proudu mezi zdrojem a zátěží (anglicky high-side sensing) umožňuje detekovat zkrat u zátěže, a právě kvůli tomu je právě high-side sensing v praxi tou používanější metodou. To i přes fakt, že zapojení je o něco komplikovanější než v případě low-side sensigu.

Pro takové měření se používá zapojení DA (viz kapitola 0), které si poradí s vysokým CMV. [2,3,5,8,9,10]

4. OPERAČNÍ ZESILOVAČE

Zesilovač (obecně) je elektronický obvod (může být integrovaný nebo složený z diskretních součástek), který zesiluje vstupní signál. Jednoduché zesilovače jsou například tranzistory v zapojení se společným emitorem/kolektorem/bází.

Operační zesilovač (dále OZ) je elektrický obvod složený z několika tranzistorových zesilovačů. V současné době je téměř vždy realizován jako integrovaný obvod, a to buď jako diskretní součástka nebo více operačních zesilovačů v jednom pouzdře. Schématická značka OZ je na obr. 3.



Obr. 3: Schématická značka operačního zesilovače

OZ jako diskretní součástka má 5 pinů.

1. Kladné napájení (VCC)
2. Záporné napájení (VEE)
3. Neinvertující vstup (+)
4. Invertující vstup (-)
5. Výstup (Out)

Ve schématech se napájecí nožičky velmi často nekreslí kvůli přehlednosti.

Jeho funkce je popsána rovnicí:

$$V_{\text{Out}} = A \cdot (V_{+} - V_{-})$$

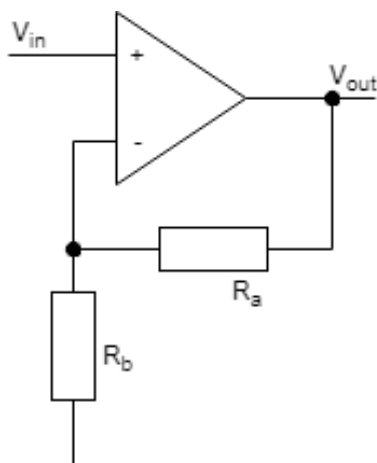
Kde A je zesílení, V_{Out} , V_{+} , a V_{-} jsou napěťové úrovně na jednotlivých nožkách. Rovnice platí, pokud všechny napěťové úrovně jsou v intervalu (V_{VEE} ; V_{VCC}) a zanedbáme všechny parazitní vlastnosti OZ.

Protože zesílení OZ bývá velmi vysoké, prakticky vždy jej zapojujeme se zápornou zpětnou vazbou, kterou si můžeme volit zesílení při návrhu zapojení. [2,4]

Pro zjednodušení návrhů bývá při výpočtech velmi často nahrazován ideálním zesilovačem, který má nekonečné zesílení, nekonečný vstupní odpor a nulový výstupní odpor. Poté můžeme prohlásit, že rovnice popisující zapojení na obr. 4 je:

$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \left(1 + \frac{R_a}{R_b} \right) \quad (\text{V})$$

kde: U_{in} je napětí na vstupu, (V)
 R_a a R_b jsou odpory. (Ω)



Obr. 4: Zapojení OZ se zápornou zpětnou vazbou

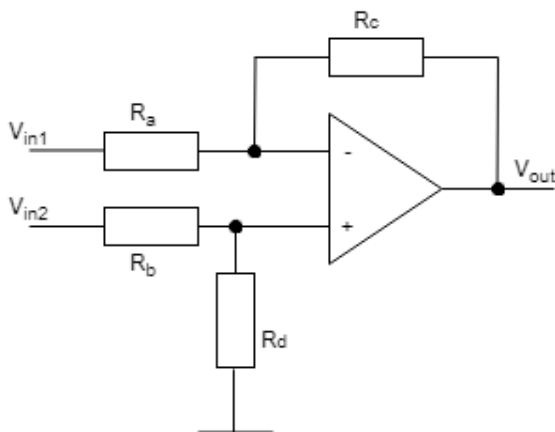
Obousměrné měření operačním zesilovačem je možné, pokud jsou OZ napájeny symetrickým zdrojem (pokud je zajištěno kladné i záporné napájení). Některé zesilovače umí měřit obě polaritu proudů i pokud je napájení pouze kladné a záporný napájecí pin je uzemněn. Tyto zesilovače lze jednoduše rozpoznat podle dalšího vstupního pinu pro napěťovou referenci. Ta funguje jako offset pro výstupní úroveň napětí. Zajišťuje tedy, že zesílená záporná hodnota napětí na vstupu se ne nutně musí projevit jako záporná úroveň na výstupu. [6]

4.1 Zapojení

OZ jsou zapojovány do složitějších obvodů tak, aby celé zapojení splňovalo určité parametry. Jedním z nejjednodušších zapojení je rozdílový zesilovač.

4.1.1 Rozdílový zesilovač

Jako rozdílový zesilovač, anglicky differential amplifier (dále DA), je označováno zapojení OZ a několika rezistorů (viz obr. 5) tak, že na vstupních svorkách DA může být napětí mimo rozsah napájecího napětí.



Obr. 5: Zapojení DA

Protože se DA zapojuje na dvě libovolná místa v obvodu, a ne jedním vstupem na zem a druhým do obvodu, odpadá problém s nenulovým odporem země při low-side sensingu. DA umožňuje měřit i na vysoké straně.

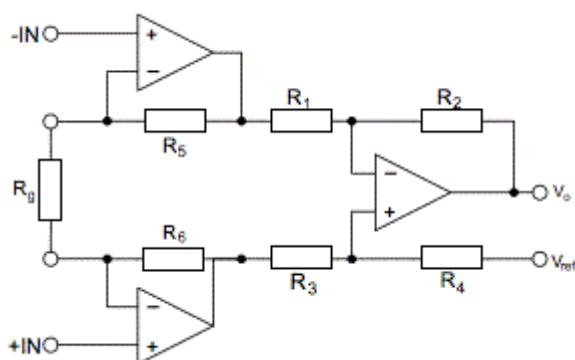
Nevýhodou DA je nižší vstupní odpor, než má samotný OZ, a tím pádem namáhání obvodu.[6]

4.1.2 Přístrojový zesilovač

Přístrojový zesilovač, anglicky instrumentation (instrumentational) amplifier (dále IA), je speciální zapojení DA se dvěma dalšími OZ na vstupu (viz obr. 6). Jeho hlavní výhodou je vysoký vstupní odpor a velmi snadná změna zesílení. Přístrojové zesilovače se prodávají jako diskretní součástky. Ty mají v dokumentaci popsané, mezi které dva piny má být vložen odpor, který určuje zesílení.

Nevýhoda IA proti DA je, že vstupní napětí na obou vstupech musí být v intervalu napájecího napětí zesilovače.

IA se používá zejména pro měření na nízké straně, ale lze jej použít i při měření na vysoké straně za pomoci plovoucího zdroje. [6]



Obr. 6: Zapojení IA (převzato a upraveno [6])

4.2 Napájecí napětí OZ

Napájecí napětí musí být v mezích určených datasheetem. Při dlouhodobém nebo výrazném překročení těchto mezí může dojít ke zničení zesilovače.

Pokud vstupní napětí operačního zesilovače překročí napájecí, dojde minimálně k nelineární funkci zesilovače, případně až k jeho zničení. [6]

Maximální velikost výstupního napětí je pospaná v datasheetu a přímo souvisí s velikostí napájecího napětí. U zesilovačů typu rail-to-rail je maximální velikost výstupního napětí přímo napájecí napětí.

4.3 Vlastnosti reálných OZ

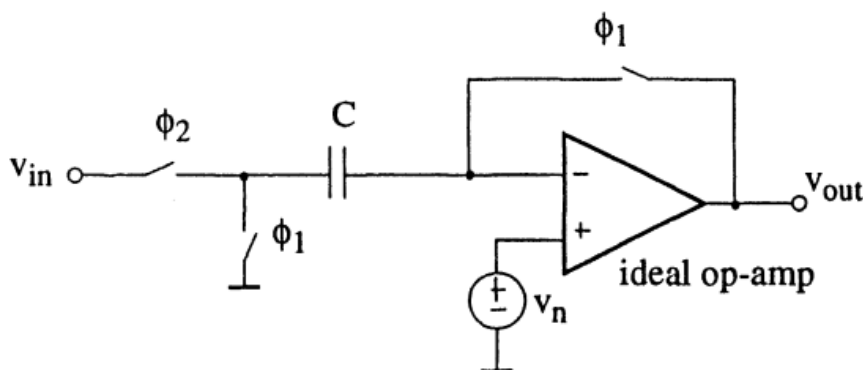
Reálné OZ mají oproti ideálním zesilovačům několik parazitních vlastností, které ovlivňují jejich chování. Současné reálné OZ se z pravidla ideálním zesilovačům velmi přibližují.

4.3.1 Offsetové napětí

Jedná se o stejnosměrné napětí na vstupu operačního zesilovače (offset voltage), které způsobuje typicky největší chybu. Definiuje se jako stejnosměrné napětí, které musí být připojeno na vstupy, aby klidové napětí na výstupu bylo 0 V. Ideální operační zesilovač, narozdíl od reálných, má $V_{os} = 0$ V. Některé operační zesilovače používají speciální opatření vedoucí k co možná největšímu potlačení V_{os} . [17]

4.3.1.1 Automatické nulování

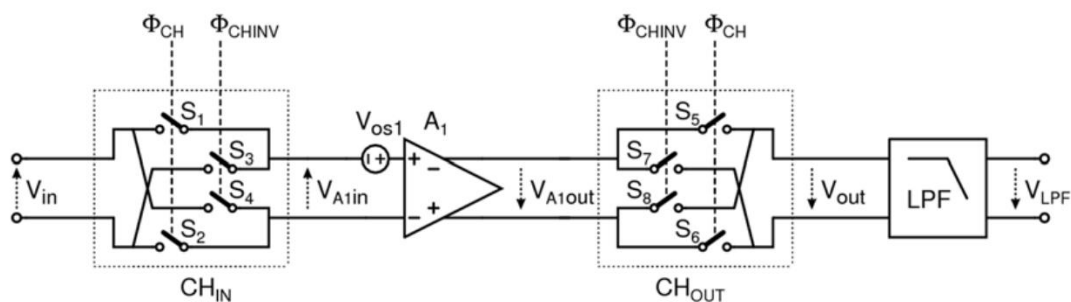
Metoda automatického nulování, anglicky označovaná jako auto-nulling, nebo auto-zeroing, spočívá v přepínání mezi dvěma stavy. První stav je nulovací, kdy je nabíjen kondenzátor (nebo nějaký obvod, schopný po určitou dobu udržet více méně konstantní napětí) na hodnotu offsetu. Druhý stav je už běžné zesílení vstupního signálu, od kterého je odečten zapamatovaný offset. [18] Principiální schéma je na obr. 7.



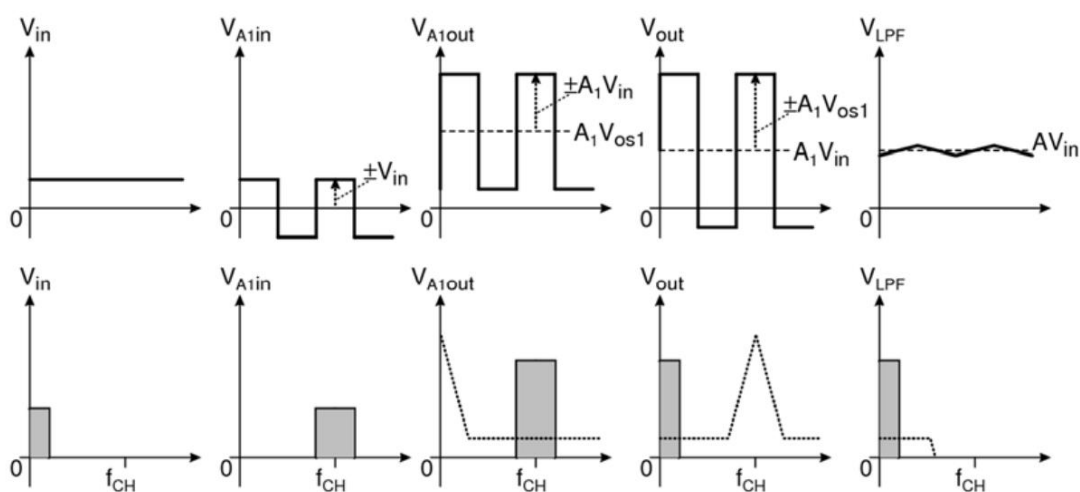
Obr. 7: Principiální schéma zesilovače s automatickým nulováním (převzato z [18])

4.3.1.2 Modulační zesilovače

Jedna z metod vedoucí k potlačení offsetového napětí operačních zesilovačů je modulování DC signálu (chopper). Tato technika funguje tak, že se nejprve vstupní stejnosměrné napětí změní modulátorem na střídavé, toto následně zesílí a výsledný signál zatížený chybou offsetu zesilovače se demoduluje synchronním demodulátorem. Výsledný signál má střední hodnotu rovnu zesílenému vstupnímu signálu a střídavá složka odpovídá zesílenému offsetovému napětí. Tato složka je odstraněna filtrem typu dolní propust. [16] Názorné schéma je na obr. 8, grafy napětí z toho schématu na obr. 9.



Obr. 8: Schéma modulačního zesilovače (převzato [16])

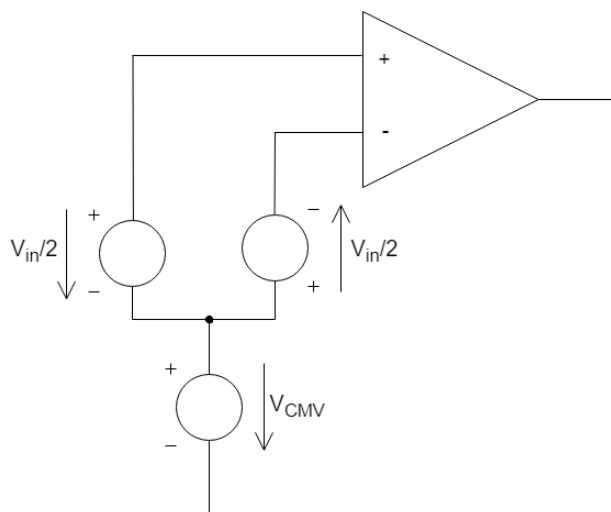


Obr. 9: Grafy napětí v časové a kmitočtové oblasti v modulačním zesilovači (převzato [16])

4.3.2 Potlačení souhlasného chybového napětí

Souhlasné chybové napětí je v angličtině je označované jako common-mode voltage (dále CMV). Jedná se o průměr napětí na vstupních svorkách operačního zesilovače. Viz obr. 10. Ideální zesilovač na toto napětí nereaguje, avšak reálné OZ přenáší toto napětí na výstup s určitým zesílením, respektive potlačením.

Anglicky se toto potlačení označuje common-mode rejection ratio (dále CMRR) a myslí se tím schopnost operačního zesilovače potlačit přenos souhlasného napětí na vstupních svorkách na výstup. Ideální zesilovač má CMRR nekonečné a CMV vůbec neovlivňuje výstupní napětí. V reálném světě toto bohužel neplatí a u reálných zesilovačů k přenosu dochází.



Obr. 10: Vysvětlení principu CMV

CMRR bývá v datasheetech zesilovačů udáváno v lineární míře (například $\mu\text{V/V}$), což znamená, jak velká bude změna napětí na výstupu, změní-li se CMV o jeden volt. Druhý způsob popisu CMRR je logaritmický (v dB), tedy o kolik decibelů je vstupní signál na výstupu utlumen. Z toho vyplývá, že pokud chceme co nejlepší potlačení a CMRR je zadáno lineárně, je nutné hledat co nejmenší hodnoty. Pokud je naopak zadáno logaritmicky, hledáme hodnoty co největší. [17]

4.3.3 Potlačení vlivu změny napájecího napětí

Anglicky power supply rejection ratio (dále PSRR) je obdobně jako v předchozí kapitole schopnost OZ potlačit přenos případné nestability napájecího napětí na výstupní napětí. [17]

4.3.4 Vliv teploty

Teplota má vliv na vlastnosti elektronických součástek, a to jak pasivních (změna odporu/kapacity), tak aktivních. U operačních zesilovačů je nejzřetelnější změna offset voltage se změnou teploty. Změna offset voltage (nejen tepelná, ale např. i časová) se nazývá drift.

Tepelný drift bývá udáván v $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (ekvivalentně $\mu\text{V/K}$ – stejná hodnota). Pro přesné aplikace je nutné hledat zesilovač s co nejmenším tepelným driftem. K dosažení dobré přesnosti je vhodné zajistit i teplotní stabilizaci zesilovačů. [17]

5. MĚŘÍCÍ REZISTORY PRO BOČNÍK

Pro vytvoření bočníku je nutné pečlivě vybrat rezistor na kterém se bude měřit úbytek napětí.

Ampérmetr by měl mít malý odpor, aby co nejméně ovlivňoval měřený obvod. Pokud by byl ale použit rezistor s příliš malou hodnotou, byl by úbytek napětí velmi malý až neměřitelný. Z toho vyplývá, že velikost měřícího odporu závisí na velikosti proudu, pro jehož měření je ampérmetr dimenzován. Velikost úbytku napětí se velmi snadno spočítá přes Ohmův zákon.

$$U = R \cdot I \quad (\text{V})$$

kde:	R	je	elektrický odpor,	(Ω)
	I	je	elektrický proud.	(A)

Aby bylo možno úbytek napětí na rezistoru správně interpretovat, je nutné, aby rezistor měl přesnou toleranci. Je možné tuto toleranci částečně ignorovat a poté ampérmetr kalibrovat na skutečnou hodnotu odporu.

Na každém rezistoru protékaném proudem se uvolňuje Jouleovo teplo podle vztahu:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (\text{J})$$

kde:	I	je	elektrický proud,	(A)
	R	je	elektrický odpor,	(Ω)
	t	je	čas.	(s)

A tudíž výkon:

$$P = I^2 \cdot R \quad (\text{W})$$

kde:	I	je	elektrický proud,	(A)
	R	je	elektrický odpor.	(Ω)

Proto se rezistory zahřívají a je tedy nutné volit takové, které mají co nejmenší teplotní koeficient odporu. Ve velmi přesných aplikacích jako je ta, kterou se zabývá tato práce vybírat odpory s malým TKR nestačí. V takových případech je vhodné volit odpory s velkou plochou, aby se z nich snadno teplo odvádělo. Dále je nutné zajistit, aby měl rezistor teplotu co možná nejstabilnější.

Teplotní koeficient odporu je udáván v ppm/°C (ppm/K) a označuje o kolik ppm hodnoty rezistoru se změní jeho odpor při změně teploty o jeden stupeň Celsia. [11,12]

V aplikacích, kde je nutné zjišťovat napěťový úbytek na rezistoru jako je například ampérmetr, se používá tzv. čtyř-vodičové zapojení. Rezistory pro tento způsob zapojení mají místo dvou kontaktů kontakty čtyři (viz obr. 11) - dva proudové, kterými do rezistoru teče pracovní proud, a dva napěťové. Díky tomuto zapojení můžeme na napěťových kontaktech měřit napěťový úbytek přímo na známém rezistoru. Napětí, které vznikne průchodem pracovního proudu pájeným spojem, proudovým kontaktem a dalšími částmi měřicího rezistoru, které mají parazitní odpor, se zde neprojeví.



Obr. 11: Čtyř-vodičový rezistor [29]

Materiálů, ze kterých se odpory vyrábí je poměrně mnoho. Existují odpory drátové, z kovové fólie, z karbonového kompozitu, tlustovrstvé, tenkovrstvé a další. Jediný důvod, proč se materiálem zabývat, je vlastní šum rezistoru. Ten je dán pohybem elektronů a jejich vzájemnou interakcí. Nejmenší šum je právě v kovových rezistorech, a proto je vhodné vybírat právě z nich. [11,12]

6. TEPLOTNÍ STABILIZACE

Změna teploty ovlivňuje vlastnosti materiálů včetně těch elektrických. Pro dosažení vysokých přesností je vhodné zajistit stabilní vlastnosti obvodu, tudíž i jeho tepelnou stabilitu. K té je možné přistupovat několika způsoby. Ten nejtriviálnější je určení pracovní teploty dostatečně vysoko nad teplotou okolí a použít vytápění, které bude zařízení držet zahřáté na požadované teplotě. Výhodou tohoto řešení je, že stačí použít snímač teploty a například výkonový rezistor, který bude zařízení vytápět a kompenzovat změny okolní teploty (když bude okolní teplota nižší, bude topit větším výkonem, pokud bude teplota okolí vyšší, bude topit méně).

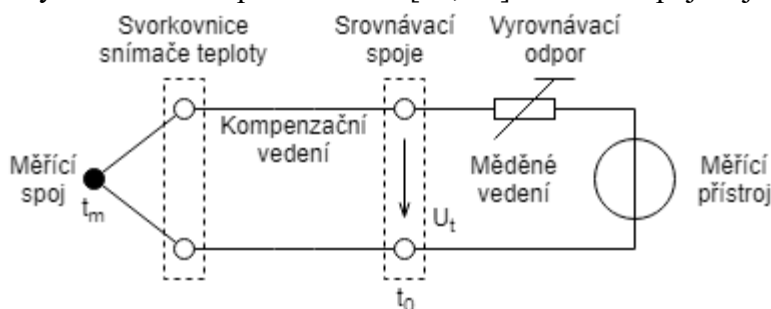
Další způsob je určit si pracovní teplotu naopak níž, než je teplota okolí a použít chlazení (například Peltierův článek). Poté tento termostat funguje analogicky k prvnímu případu.

Poslední možnost je, že provozní teplota je přibližně stejná jako je okolní teplota a za pomoci například Peltierova článku se zařízení buď ohřívá, nebo dochlazuje v závislosti na kolísání okolní teploty a změnách ztrátového výkonu uvnitř zařízení.

6.1 Snímání teploty

Ke snímání teploty je možné použít termočlánek, termistor nebo teplotní čidlo.

Termočlánek funguje na principu spojení dvou různých kovů a vzniku termoelektrického napětí, které lze změřit, a podle charakteristiky spočítat teplotu. Velkou nevýhodou tohoto řešení je nutnost druhé konce drátků z různých kovů udržovat v termostatovaném prostředí, protože i na těchto koncích vzniká termoelektrické napětí, které by se měnilo s teplotou okolí. [20, 21] Schéma zapojení je na obr. 12.



Obr. 12: Schéma měření teploty termočlánkem převzato z [19]

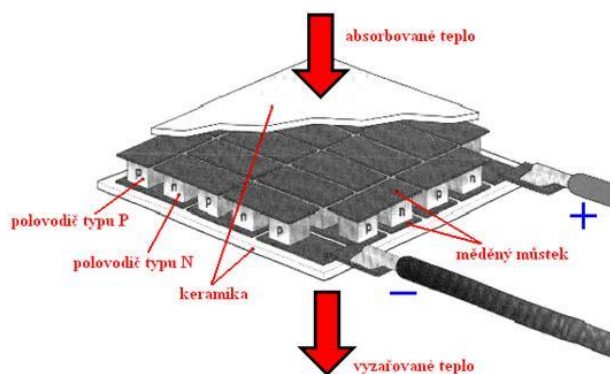
Termistor je zjednodušeně řečeno odpor s velkým TKR. Je to prvek, jehož elektrický odpor se mění v závislosti na teplotě. Nejčastěji používané jsou termistory s negativním součinitelem odporu (NTC – negative temperature coefficient), které mají relativně výraznou změnu odporu se změnou teploty. Proti tomu termistory s pozitivním součinitelem odporu (PTC – positive temperature coefficient) mají lineárnější

charakteristiku, avšak menší změnu odporu s teplotou. Díky lineárnější charakteristice jsou vhodné pro přesné aplikace. [20]

Teplotní čidla měří teplotu různým způsobem (například kalibrovanou změnou zesílení tranzistoru se změnou teploty), tu následně převádí buď na digitální slovo, které posílají ve formě sériových dat například do mikrokontroléru, nebo na PWM signál, jehož střída se odvíjí od měřené teploty.

6.2 Peltierův článek

Peltierův článek funguje na principu Peltierova jevu, který říká, že když dvěma vodiči z různých kovů zapojených v sérii prochází stejnosměrný proud, jeden z kovů se v okolí spoje ohřívá a druhý ochlazuje. Tento princip platí i pro různě dotované polovodiče, které se používají právě v Peltierových článcích. Ty jsou konstruovány jako několik takových přechodů zapojených z elektrického pohledu sériově a z pohledu toku tepla paralelně. [21] Viz obr. 13.



Obr. 13: Peltierův článek [30]

6.3 Regulace

Pro regulaci teploty je možné použít P, PI nebo PID regulátor. Písmena v názvu pochází z principu funkce daného regulátoru. P značí proporcionální, I integrační a D derivační složku.

Proporcionální regulátor je takový, jehož výstupní veličina je přímo úměrná odchylce naměřené veličiny od požadované. Například pokud naměříme nižší teplotu, než na kterou chceme vytápět, je dodávaný výkon přímo úměrný rozdílu teplot. To s sebou nese nevýhodu. Pokud se pohybujeme u malého rozdílu teplot, kdy dodávaný výkon odpovídá přirozenému přestupu tepla ze zařízení do okolí, zařízení se tak nikdy neohřeje na požadovanou teplotu.

Integrační složka řeší problém z předchozího odstavce tím, že dodávaný výkon je přímo úměrný časovému integrálu odchylky. Tím docílíme toho, že integrál této malé odchylky způsobí dostatečný dodávaný výkon. PI regulace je součtem P a I složky a její

nevýhoda je, že regulační děj probíhá pomaleji, než v případě P regulátoru. Další problém, který může vzniknout jsou překmity a oscilace.

Ke zrychlení regulačního děje slouží derivační složka, která se opět přičítá k PI regulátoru. Její velikost je přímo úměrná derivaci odchylky. Nastavení všech parametrů PID regulátoru tak, aby reguloval co nejrychleji, ale nedocházelo k překmitům, je velmi složité. Je vhodné použít automatické ladění. [22]

7. NÁVRH KONCEPCE

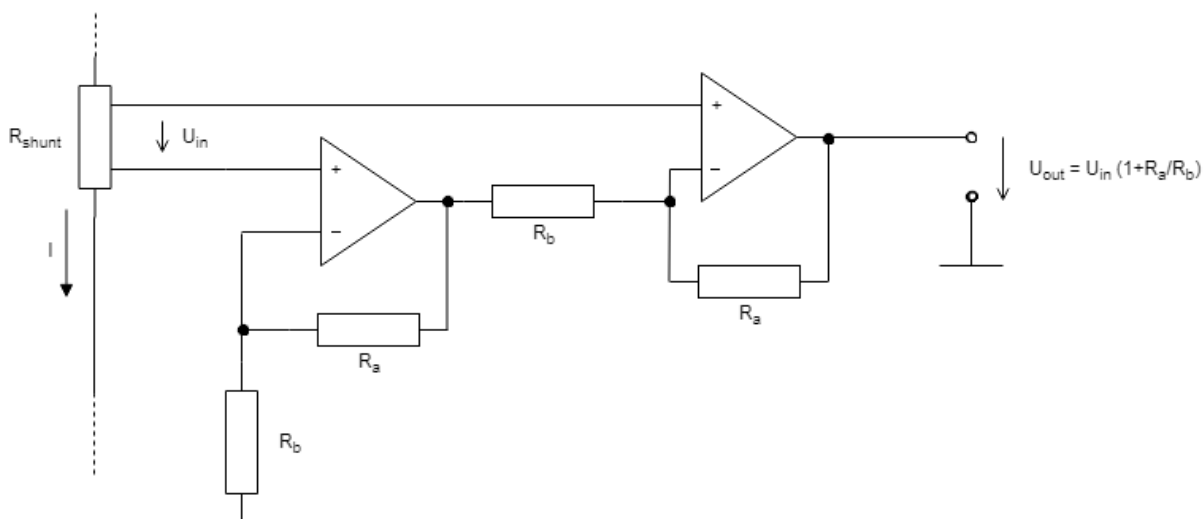
Pro tuto aplikaci bude použita přímá metoda měření proudu tak, jak je popsáno v kapitole 3.2, tedy nechat měřený proud protékat rezistorem. Tím na rezistoru vznikne napětí, které bude pomocí zesilovače zesíleno. O snímání napětí na výstupu zesilovače a záznam těchto hodnot se bude starat voltmetr KEITHLEY 2002 připojený k PC. Hodnoty postupně naměřené v čase budou ukládány do souboru .csv.

Tento voltmetr má $7\frac{1}{2}$ místný displej a na rozsazích 2 a 20 V vstupní odpor $>100\text{ G}\Omega$. Pro tyto rozsahy umí za zvýšené přesnosti dosahovat rozlišení až 10, respektive 100 nV. Jeho teplotní stabilita je 0,2 ppm ze čtení + 0,18 ppm z rozsahu na 1 °C pro 2 V, respektive 0,3 + 0,02 ppm/°C pro 20 V rozsah. Vzhledem k tomu, že zařízení bude používáno v klimatizovaných prostorách se stálou teplotou, je tato teplotní stabilita dostatečná.

7.1 Přístrojový zesilovač

Jedna z možností zesílení napětí na měřícím odporu je použití přístrojového zesilovače, protože na rozdíl od klasického zapojení diferenciálního zesilovače má velmi vysoký vstupní odpor a tím nezatěžuje měření chybou způsobenou proudem tekoucím do/z zesilovače.

7.2 Modifikovaný diferenční zesilovač



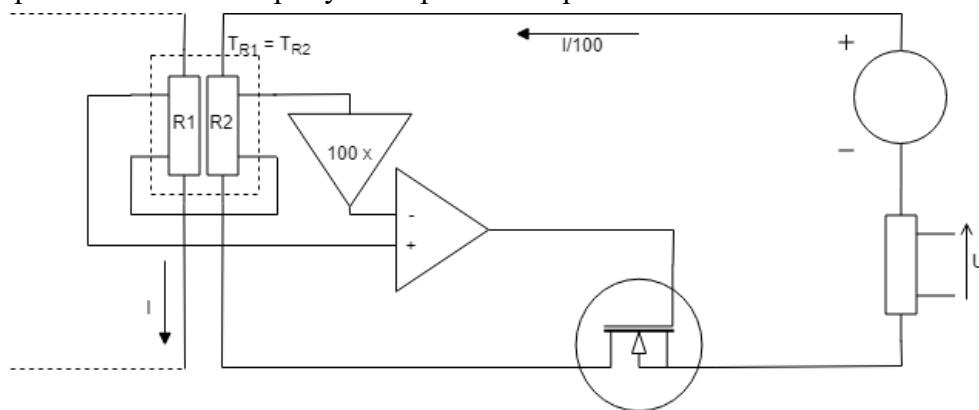
Obr. 14: Zapojení modifikovaného DA

Další varianta zapojení zesilovače (viz obr. 14) je použita ve zpětnovazební smyčce měřeného zdroje. Jedná se v podstatě o modifikovaný diferenciální zesilovač používající dva operační zesilovače. Rezistor je připojený přímo na neinvertující vstupy operačních zesilovačů, takže vstupní odpor je velmi vysoký.

7.3 Proudové zrcadlo

Protože měřený proud je převáděn na napětí pomocí rezistoru, a zařízení má docílit přesnosti 1 ppm, je nutné, aby měřicí odpor nekolísal o více než právě 1 ppm. Rezistory o hodnotách setin až desetín ohmu (které by byly vhodné jako bočník pro proudy do 10 A) jsou běžně k dostání pouze o hodnotách TKR 10 ppm/°C a více. Z toho vyplývá, že by musela být zajištěna stabilizace teploty rezistoru nejhůře na desetinu stupně Celsia. Pro dosažení takové přesnosti stabilizace by bylo třeba teplotu rezistoru ještě s větší přesností měřit.

Řešením tohoto problému může být převedení měřeného proudu na menší proud pomocí proudového zrcadla se zesilovačem. Viz obr. 15. V tomto případě by byly použity dva stejné rezistory, které by byly teplotně provázané tak, aby byla automaticky kompenzována změna teploty a tím pádem i odporu.



Obr. 15: Proudové zrcadlo

Tohle zapojení má dvě zásadní výhody oproti předchozím. Pokud se proud v druhém okruhu zmenší například stokrát, jak je na obrázku, může být použit stokrát větší měřicí odpor, který lze koupit s TKR 1ppm/°C. Tím pádem se sníží přesnost, se kterou je třeba tento odpor teplotně stabilizovat. Druhou výhodou je, že se stokrát sníží výkon na tomto odporu, čímž se zjednoduší teplotní stabilizace.

Zapojení ale předpokládá, že TKR rezistorového páru R_1 a R_2 bude shodné, že budou dobře teplotně provázány a také, že zesílení napětí na R_2 bude stabilní.

7.4 Výběr OZ

Pro dosažení co nejlepšího výsledku musela být věnována pozornost i výběru správného zesilovače.

7.4.1 AD8676

Tento zesilovač je použit ve zdrojích OLSD a OOLD pro kontrolování interních zdrojů referenčních napětí, proto byl z počátku uvažován jako vhodná varianta. Jeho offsetové napětí je 12 μV , CMRR 130 dB a PSRR 120 dB. [23]

7.4.2 OPA2188

Protože má být sestrojeno zařízení, které bude přesnější než tyto zdroje, byl vyhledán zesilovač s lepšími parametry, než je použit v nich. Vyhledán byl zesilovač, který bude používat chopperování i automatické nulování a současně bude mít co nejlepší potlačení CMV i kolísání napájecího napětí.

OPA2188 má offset votlage 6 μV , CMRR 146 dB a PSRR 142 dB. Všechny tyto parametry jsou výrazně lepší než u (už i tak dobrého) zesilovače AD8676. [24]

7.5 Výběr měřicího rezistoru

Jeden z klíčových kroků návrhu ampérmetru je výběr měřicího rezistoru. Viz kapitola 5. Pro takové měření jsou používány prakticky výhradně čtyř-vodičové odpory s proudovými a napět'ovými kontakty.

Pro různá zvažovaná zapojení se hodí různé rezistory. Jako nejpravděpodobnější volba pro zapojení s diferenciálním zesilovačem se zdál SPR 4-T220 T221 [25], který se vyrábí v široké škále hodnot a je možné jej zakoupit s TKR 5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ (některé hodnoty dokonce 2 ppm/ $^{\circ}\text{C}$).

Pro zapojení s proudovým zrcadlem by mohl být vhodný například rezistor 71-S102K-20-T s TKR 1 ppm/ $^{\circ}\text{C}$. Tento rezistor se bohužel nevyrábí ve čtyř-vodičovém provedení. [26]

Po dlouhém hledání byl nalezen vhodný měřicí rezistor na amerických stránkách farnellu newark.com. Jedná se o čtyřvodičový měřicí rezistor s odporem 100 m Ω , výkonovou zatížitelností až 30 W a TKR 1 ppm/K při 25 $^{\circ}\text{C}$ až 60 $^{\circ}\text{C}$. Jeho označení je USR 4-3425 0R100 D 1%. [27]

7.6 Zpětnovazební rezistory

Protože ze simulace vyšly zpětnovazební rezistory vedle měřicího rezistoru jako jedno z nejchoulostivějších míst celého zapojení, jejich výběru byla věnována náležitá pozornost.

Rezistorová síť Y1365V0008QT9R se vyrábí ve dvou provedeních. 2 \times 1k Ω + 2 \times 10k Ω nebo 4 \times 10k Ω . TKR těchto rezistorů je 2 ppm/ $^{\circ}\text{C}$. Velká výhoda celého zapojení je, že se chyba způsobená změnou odporů ve zpětné vazbě kompenzuje, pokud je ta

změna shodná na obou rezistorech. Protože jsou jednotlivé odpory v rezistorové síti teplotně provázány, tak se teplotní změna jejich odporu neprojeví na výsledném zesílení.

7.7 Obvodová simulace

V programu OrCad byla modelována zapojení s přístrojovým zesilovačem i zapojení s modifikovaným diferenciálním zesilovačem pro operační zesilovače AD8676 i OPA2188. Pro oba OZ vyšlo zapojení s modifikovaným diferenciálním zesilovačem tak, že při vstupním napětí 0 V bylo na výstupu menší napětí než 1 pV. Pro zapojení s přístrojovým zesilovačem to bylo v řádu stovek μV . Proto bylo rozhodnuto, že přístrojový zesilovač nebude nepoužit.

Dále byla provedena citlivostní analýza pro zapojení modifikovaného DA s použitými zesilovači OPA2188 pro různé hodnoty měřicího rezistoru i pro různé nastavení zpětné vazby na zesílení $2\times$ a $11\times$. V obou případech vyšla citlivost výstupního napětí na změnu odporu měřicího rezistoru jedna ku jedné, tedy, že změna hodnoty rezistoru o 1 ppm se projeví změnou výstupního napětí právě o 1 ppm, což je samozřejmé.

Další parametry, na jejichž změnu je výstupní napětí velmi citlivé jsou zpětnovazební odpory u operačních zesilovačů. Pro zesílení $11\times$ je citlivost téměř stejná jako u měřicího rezistoru a pro zesílení $2\times$ je přibližně poloviční.

Výsledky citlivostní analýzy jsou v přílohách 1 až 3.

7.8 Chlazení bočníku

První verze bočníku bude chlazena masivním pasivním chladičem. Ten zajistí odvod tepla vyprodukovaného ztrátovým výkonem na měřicím rezistoru ale také poslouží pro krátkodobou tepelnou stabilizaci díky své tepelné kapacitě.

8. REALIZACE A TESTOVÁNÍ

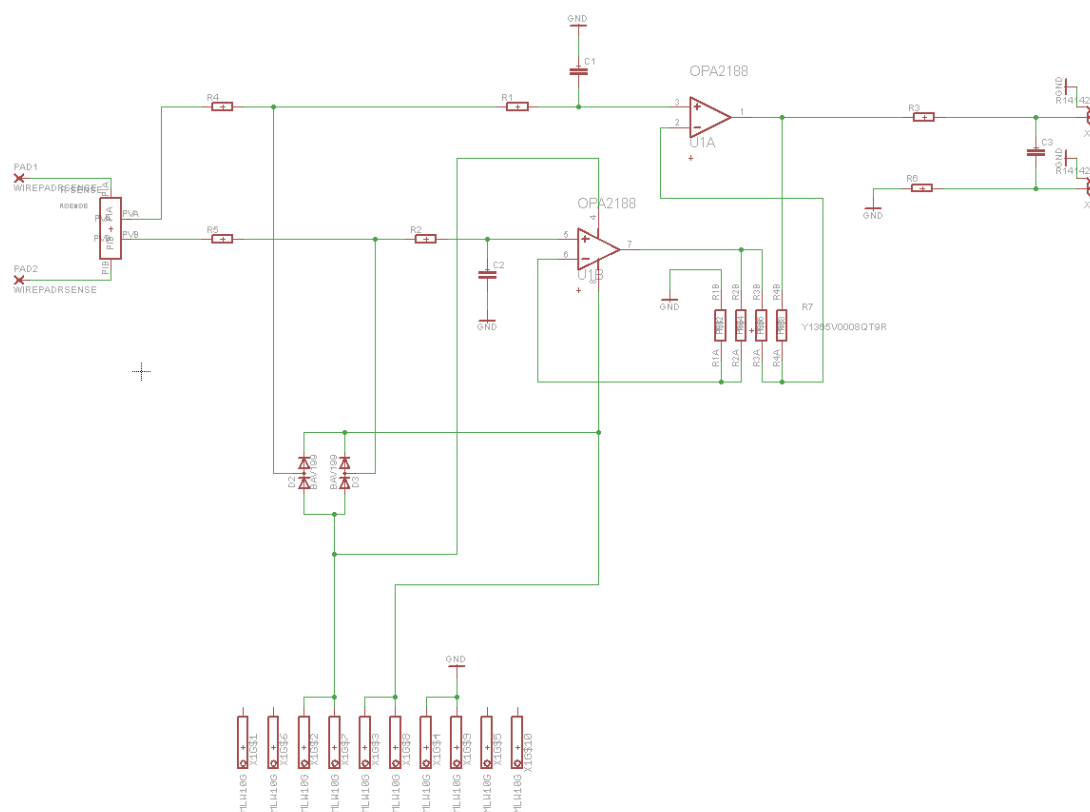
Návrh konkrétního zapojení a design desek plošných spojů byl vytvořen v programu EAGLE.

8.1 Bočník

První deska je samotný bočník, její zapojení je na obr. 16. Obsahuje měřicí rezistor, integrovaný obvod s operačními zesilovači, zpětnovazební rezistory a BNC konektory pro napěťový výstup směrem k voltmetru KEITHLEY 2002. Samotný layout desky je na obr. 17.

Za napěťovými vývody rezistoru jsou diody BAV199 pro zajištění stavu, kdy potenciál na rezistoru bude stejný jako potenciál napájecího napětí OZ. Hodnoty rezistorů před vstupy OZ jsou 47 Ω . Jsou voleny tak, aby při maximálním kolísání bias a offsetového proudu OZ podle datasheetu neovlivnily měření o více než 0,1 ppm.

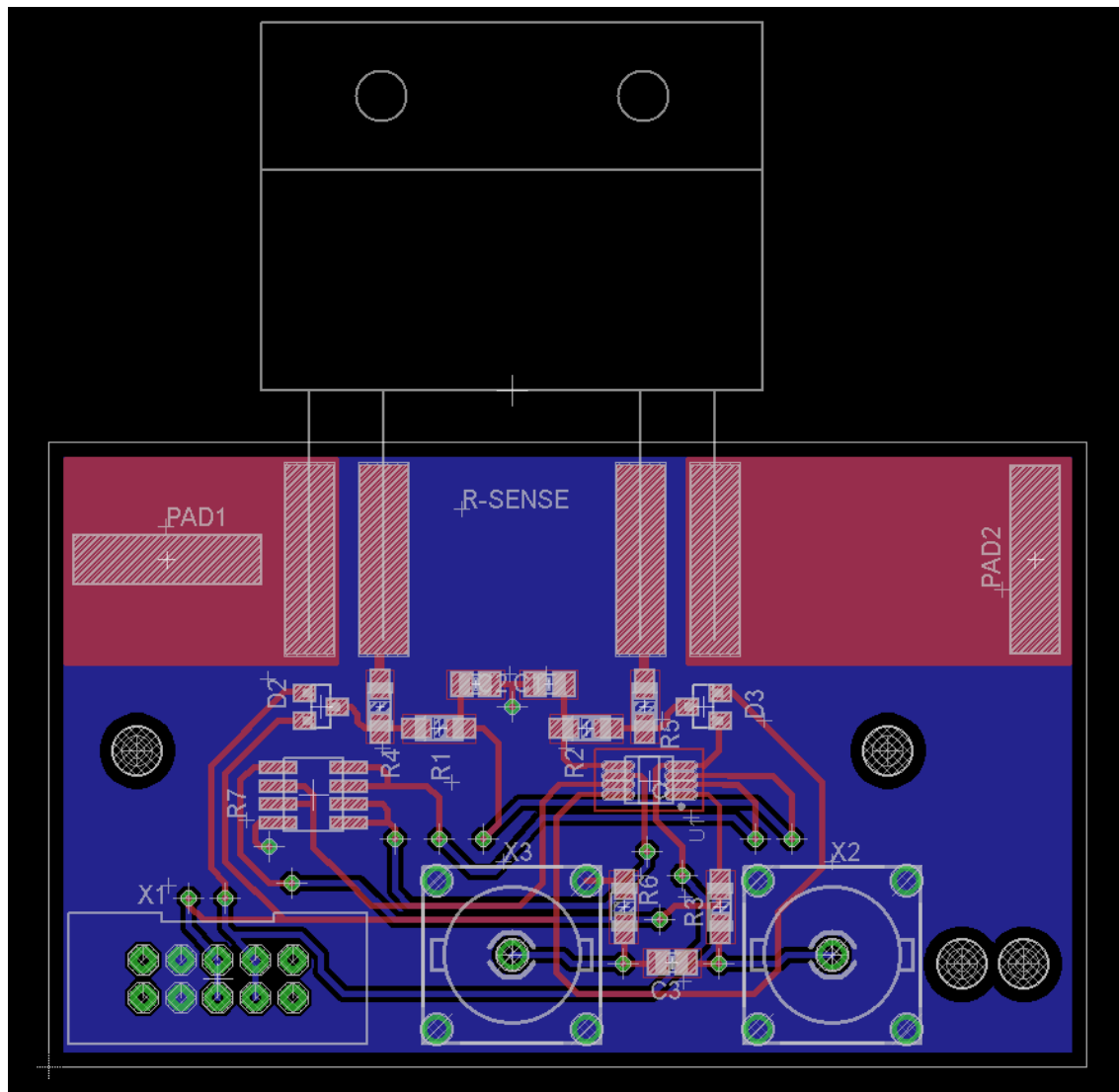
Kondenzátory mají hodnotu 10 nF a jsou z dielektrického materiálu NP0.



Obr. 16: Schéma bočníku

Na layoutu desky jsou vidět velmi široké proudové cesty k měřicímu rezistoru s velkými pájecími pady. Na tyto pady budou připájeny proudové vodiče, které dále povedou přichystanými otvory v desce pro zvýšení mechanické pevnosti.

Horní část desky, obsahující většinu součástek, zejména OZ a rezistorovou síť, bude podepřena chladicí podložkou. Proto se v této části desky nachází pouze jeden prokov, který je na zemním potenciálu. Ostatní prokovy a konektory, které budou připájeny skrz desku, jsou ve spodní části desky, kde už nebude zavazet chladicí podložka.



Obr. 17: Layout bočníku

8.1.1 Zesilovač

Během přípravy byly zvažovány různé způsoby zesílení napětí na měřicím rezistoru. Viz kapitola 7.

Vzhledem k výsledkům simulací byla vyloučena varianta přístrojového zesilovače a rozhodovalo se mezi diferenciálním zesilovačem a použitím proudového zrcadla, které by řešilo problém vysokého TKR u rezistorů s malou hodnotou.

Díky tomu, že byl nalezen rezistor s vhodnými parametry pro použití s diferenciálním zesilovačem bylo použito právě tohle zapojení.

Proudové zrcadlo by bylo zbytečně složité a mohlo by do měření vnášet dodatečné nepřesnosti a komplikace, například teplotní provázání dvou rezistorů nebo třeba ne úplně shodný průběh TKR napříč teplotami.

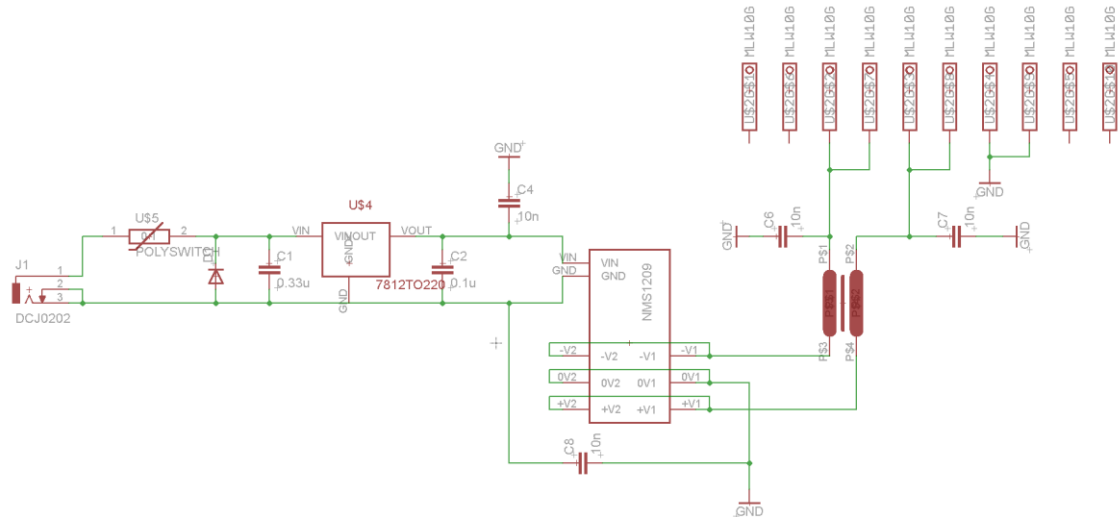
8.1.2 Konektory

Pro přivedení napájecího napětí pro operační zesilovače byl zvolen konektor MLW10. Jedná se o jednoduchý konektor pro propojení dvou nebo více celků v rámci jednoho zařízení. Tento konektor je zapojen na plochý kabel. Elektricky je zapojen zdvojeně tak, že z obou krajů je pár vodičů nezapojený, mezi nimi je pár vodičů s plovoucí zemí, pár vodičů s kladnými devíti volty a poslední pár se zápornými devíti volty proti plovoucí zemi.

Pro výstupní napětí je vyvedeno na dva 90° BNC konektory. Z bočníku bude přivedeno k voltmetru Keithley 2002 dvěma koaxiálními vodiči pro maximalizaci stínění proti případnému rušení.

8.2 Zdroj napětí

Druhá deska obsahuje stabilizátor napájecího napětí ze síťového adaptéru a zdroj plovoucího napájecího napětí operačních zesilovačů. Její schéma je na obr. 18.



Obr. 18: Schéma zapojení zdroje

8.2.1 Vstupní ochrany

Tato deska je vybavena ochranou proti přepólování a nadproudu na vstupu. Jedná se o diodu zapojenou paralelně k napájecím svorkám v nepropustném směru. Kdyby bylo přiloženo opačné napětí, dioda by vstupní kontakty zkratovala a tento vysoký proud by otevřel vratnou pojistku (polyswitch), která je zapojena takovým způsobem, že by došlo k přerušení kladné napájecí větve (na které by v tomto případě bylo zapojeno záporné napětí).

Výhodou tohoto zapojení je menší úbytek napětí na polyswitchi při běžném provozu, než by byl na diodě zapojené sériově v propustném směru. Současně také dochází k již zmíněné ochraně proti nadproudu při správné polaritě napětí.

Další variantou ochrany přepólování by mohlo být použití unipolárního tranzistoru kdy by došlo ještě k menšímu úbytku napětí. Takové zapojení je jednak zbytečně o něco komplikovanější a navíc nekombinuje současnou ochranu před nadproudem.

8.3 Zemní plochy

Na layoutu desky (obr. 19) je vidět, že byly použity dvě zemní plochy. Po obvodu, kolem montážních otvorů a v horní polovině desky je skutečná zem. Ve spodní části desky je již plovoucí pracovní zem, která je společná s deskou s bočníkem.

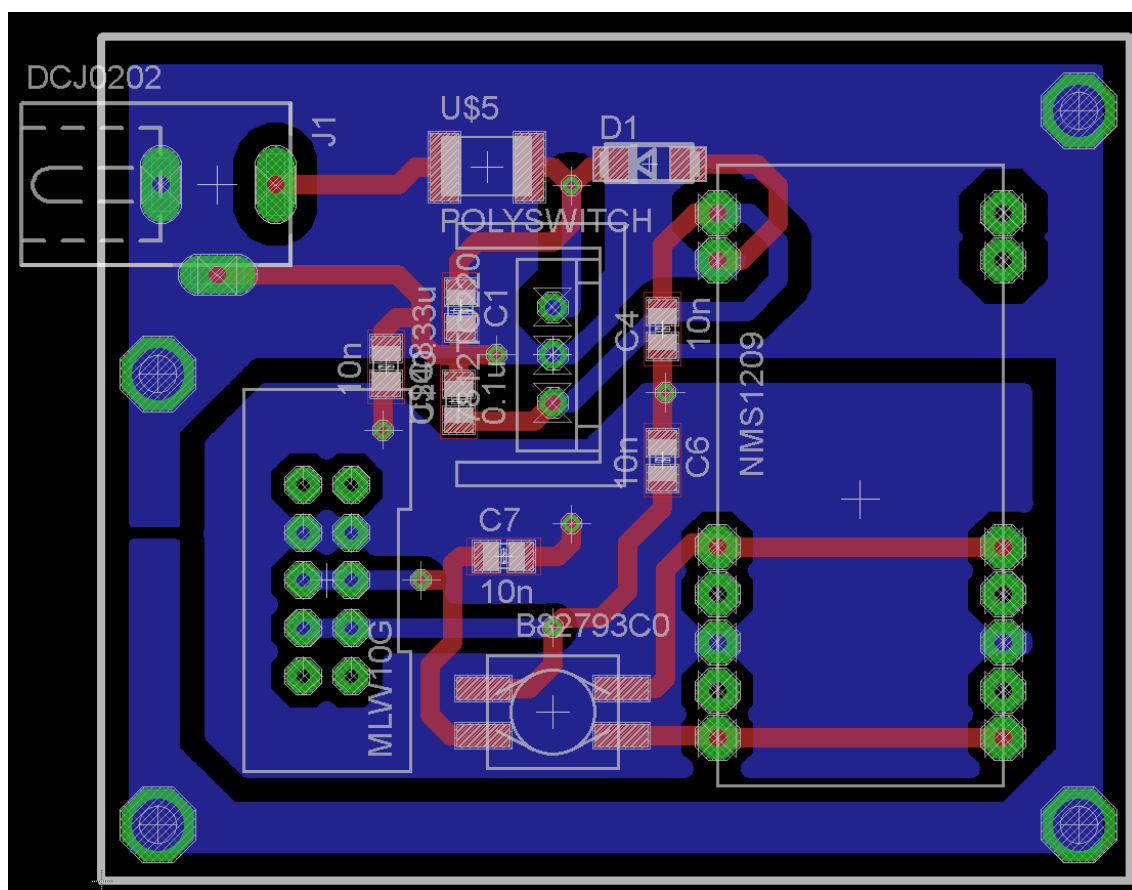
8.3.1 Stabilizace napájecího napětí

Pro stabilizaci napětí ze síťového adaptéru je použit stabilizátor 7812 CV-DG STM v pouzdře TO220. Tento typ pouzdra byl, na rozdíl od SMD provedení, použit díky jeho výrazně lepším tepelným vlastnostem. Dobré tepelné vlastnosti jsou ještě podpořeny malým chladičem určeným právě pro pouzdro TO220.

8.3.2 Zdroj plovoucího napětí

Zdrojem plovoucího napětí je DC/DC měnič MS1209, který převádí napětí 12 V ze stabilizátoru na symetrické plovoucí napětí 9 V. Stabilizátor z předchozí kapitoly je nutný, protože vstupně-výstupní charakteristika zdroje NMS1209 je prakticky lineární, takže by případné kolísání napětí z externího zdroje přenášelo až k OZ.

Použitý zdroj napětí má dva na sobě nezávislé výstupy. Ty jsou propojeny paralelně pro dosažení větší stability a výkonové zatížitelnosti.

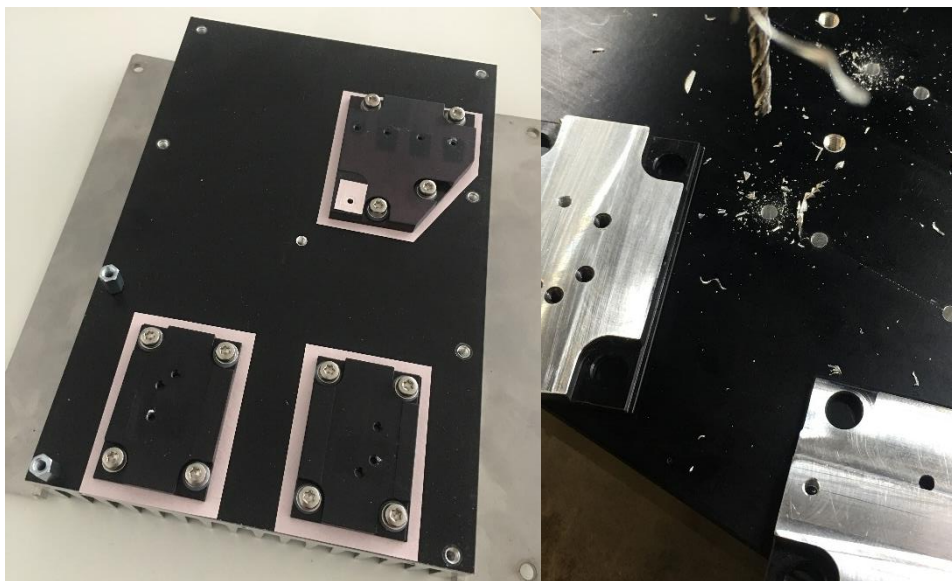


Obr. 19: Layout zdroje

8.4 Chladič

Na první verzi pro testování byl použit chladič SK85 SA z vadné karty pro řízení cívek elektronové optiky určené k vyhození. Chladič má rozměr $160 \times 237 \times 40$ mm a hmotnost 2,2 kg. Výkres chladiče - viz příloha 4.

Na zmiňované kartě je celkem šest výkonových tranzistorů připevněných k hliníkovým meziblokům. Mezibloky jsou od chladiče elektricky a částečně tepelně izolované pomocí papíru (viz obr. 20). Elektrická izolace je nutná, protože plochy pro připevnění chladiče na tranzistor jsou elektricky zapojeny jako kolektor. Zvýšení tepelného odporu mezi mezibloky a chladičem se využívá k tepelnému provázání mezi jednotlivými tranzistory na daném mezibloku.

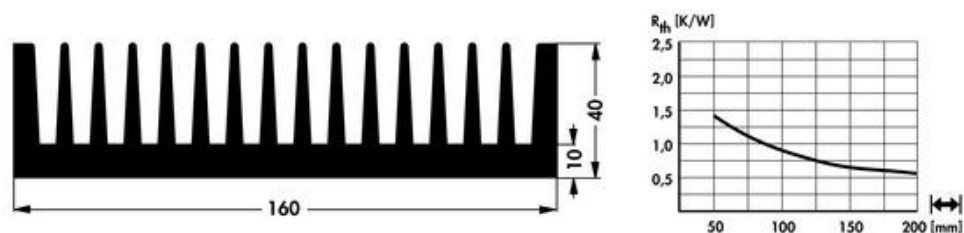


Obr. 20: Chladič s mezibloky (vlevo), vrtání otvorů a upravené mezibloky (vpravo)

Tento chladič byl odstrojen od všech krytů, úchytů ale i mezibloků. Mezibloky byly následně upraveny na frézce tak, aby se daly použít pro účely testování bočníku. Do chladiče byly vytvořeny nové montážní otvory pro novou pozici mezibloků.

8.4.1 Teplotní model chladiče

Pro odhad ohřátí chladiče při maximálním zatížení stačí znát jeho tepelný odpor a maximální dodávaný výkon. Délka chladiče je 239 mm a podle obr. 21 můžeme počítat s tepelným odporem přibližně 0,5 K/W (graf končí u 200 mm, ale protože výpočet je pouze orientační, můžeme zaokrouhlovat).



Obr. 21: Parametry chladiče

Z tepelného odporu $R_{HS} = 0,5 \text{ K/W}$ a maximálního plánovaného dodávaného výkonu $P_{R;\max} = 10 \text{ W}$ vyplývá oteplení chladiče oproti teplotě okolí o

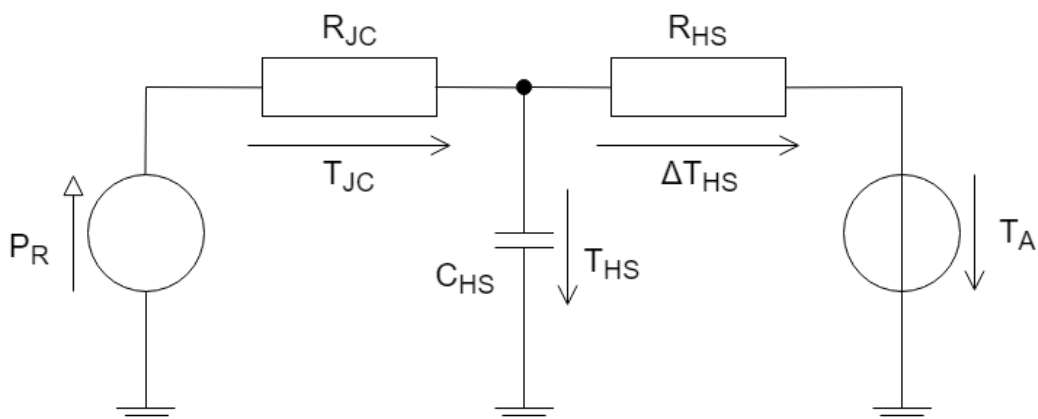
$$\Delta T_{HS} = R_{HS} \cdot P_{R;\max} = 0,5 \text{ K/W} \cdot 10 \text{ W} = 5 \text{ K} (= 5 \text{ }^{\circ}\text{C}).$$

Pro odhad doby potřebné pro tepelné ustálení je nutné znát i tepelnou kapacitu chladiče. Tu vypočteme z hmotnosti chladiče (viz příloha 4) $m = 2,203 \text{ kg}$ a měrné tepelné kapacity hliníku $c = 896 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$. [32]

$$C = m \cdot c = 2,203 \text{ kg} \cdot 896 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)} = 1974 \text{ J/K}$$

Tepelné schéma tohoto systému vidíte na obr. 22. Zdroj výkonu P_R představuje ztrátový výkon na měřicím rezistoru. Odpor R_{JC} je tepelný odpor mezi fólií rezistoru a pouzdrem. Jediný dopad, který zde má, je oteplení fólie rezistoru vůči teplotě chladiče (T_{JC}), proto ho pro tento výpočet nemusíme uvažovat. T_A označuje teplotu okolí, T_{HS} teplotu chladiče a ΔT_{HS} oteplení chladiče proti teplotě okolí. V následujících úvahách je stanovena počáteční podmínka $T_{HS} = T_A$. Kapacita C_{HS} označuje tepelnou kapacitu chladiče a odpor R_{HS} označuje tepelný odpor chladiče. Tyto dva prvky mají časovou konstantu τ .

$$\tau = C_{HS} \cdot R_{HS} = 1974 \text{ J/K} \cdot 0,5 \text{ K/W} = 987 \text{ s} (\sim 17 \text{ min}).$$



Obr. 22: Tepelné schéma

Protože maximální ohřátí chladiče ΔT_{HS} je o $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a TKR použitého měřicího rezistoru je 1 ppm/K , budeme uvažovat chladič za ustálený po ohřátí o $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Obecný vzorec pro přechodový jev je:

$$T_{\text{HS}} = T \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

kde:	T_{HS}	je	oteplení chladiče,	(K)
	T	je	konečná teplota,	(K)
	t	je	čas,	(s)
	τ	je	časová konstanta.	(s)

Po úpravě dostaneme:

$$t = -\tau \cdot \ln\left(1 - \frac{T_{\text{C}}}{T}\right)$$

Dosazení:

$$t = -987 \text{ s} \cdot \ln\left(1 - \frac{4 \text{ K}}{5 \text{ K}}\right) = 1589 \text{ s} (\sim 26 \text{ min})$$

Doba potřebná pro tepelné ustálení je tedy minimálně 26 minut.

8.5 Osazení

Obě DPS byly zhotoveny firmou Gatema a.s. Část součástek byla objednána přes firmu Farnell element14 (respektive její americkou značku newark.com), další část byla koupena v GM Electronic, spol. s r. o.

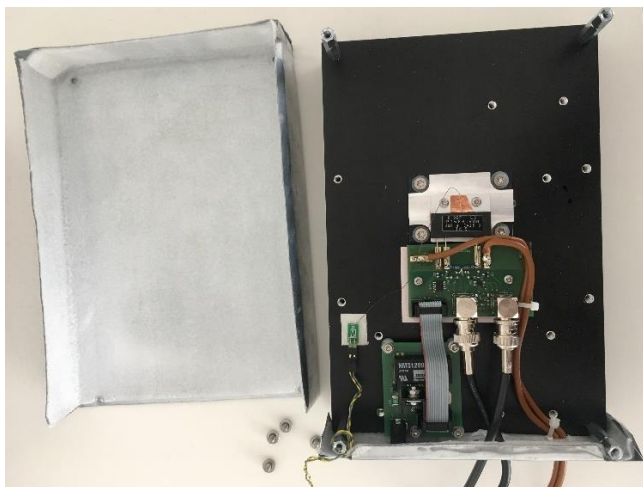
Pro osazení byla použita ruční digitální pájecí stanice ProsKit bezolovnatá pájka a pájecí kapalina. Pájení SMD součástek a konektorů proběhlo bez problémů. Pouze konektorům BNC musely být pilníkem opracovány piny pro mechanické ukotvení a stínění kvůli mírně odlišnému footprintu.

8.6 Výroba krytu

Kryt ampérmetru byl vyroben z železného pozinkovaného plechu. Je složen ze dvou částí. Čelo, kterým prochází všechny kabely je přišroubováno k chladiči pomocí tří šroubů. Druhý celek tvoří čtyři stěny a je uchycen k chladiči přes distanční sloupky. Poslední stěnu tvoří samotný chladič

Všechny plechové části jsou zevnitř polepeny vrstvou mirelonu pomocí univerzálního lepidla ve spreji (viz obr. 23). Volný prostor uvnitř krytu je vystlán volně

vloženým mirelonem tak, aby se zmírnilo proudění vzduchu uvnitř krabičky. Tím se pomůže k lepší teplotní stabilizaci.



Obr. 23: Kryt

8.7 Elektrické měření

Po osazení obou DPS, přichystání potřebné kabeláže, zdrojů a multimetrů bylo provedeno oživení přípravku a ověření správné funkčnosti. Napětí na výstupu odpovídalo proudu bočníkem podle návrhu.

$$U_{\text{out}} = R \cdot I \cdot A = 0,1 \, \Omega \cdot I \cdot 2 = I \cdot 0,2 \, \Omega \quad (\text{V})$$

kde

R	je	odpor měřicího rezistoru,	(Ω)
I	je	měřený proud,	(A)
A	je	zesílení zesilovače.	(-)

Při zkoumání napětí v jednotlivých částech obvodu byly zjištěny následující poznatky:

1. Úbytek napětí na proudových terminálech měřicího rezistoru je až dvakrát větší než na napěťových. Více v kapitole 9.1.
2. Výstupní napětí měniče NMS1209 na prázdko je až $\pm 13 \, \text{V}$ (nominální napětí je $\pm 9 \, \text{V}$), i při velmi mírném zatížení se výrazně mění. Více v kapitole 9.2.

8.8 Testování v tepelné komoře

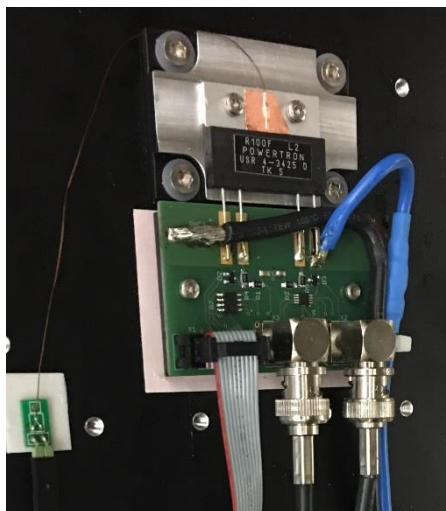
První fáze testování proběhla v tepelné komoře VöTSCH VT³ 4018, která stabilizuje teplotu vzduchu uvnitř. Měřicí pracoviště je na obr. 24.



Obr. 24: Měřicí sestava s tepelnou komorou

8.8.1 První test

První test v tepelné komoře byl proveden při teplotě 30 °C. Měřícím odporem protékal proud 7 A vybuzený laboratorním zdrojem PowerFlex QPX1200S v režimu konstantního proudu bez jakékoli další zátěže. V takovém režimu použitý laboratorní zdroj dodává nepříliš stabilní proud, nicméně stále dostačující pro první náhled do funkce ampérmetru. Na kovové části měřícího rezistoru určené k montáži na chladič byl nalepen NTC termistor pomocí měděné samolepící fólie pro dosažení co nejlepšího tepelného provázání. Viz obr. 25.



Obr. 25: Umístění NTC termistoru na měřící odpor

Napájecí deska byla napájena 15 V z laboratorního zdroje HP E3631A. Výstupní napětí bylo snímáno digitálním multimetrem KEYTHLEY 2002. Odpor NTC termistoru byl měřen multimetrem Agilent 34411A. Oba multimetry připojeny přes sběrnici GPIB k notebooku zapisovaly hodnoty s periodou 100 ms po dobu 2000 s do souborů .csv.

Data byla následně zpracována do grafů (viz příloha 5). Z grafu vývoje teploty je patrné, že během 2000 s (cca půl hodiny) je teplota rezistoru prakticky ustálena. Tím je teoretický výpočet z kapitoly 8.4.1 ověřen.

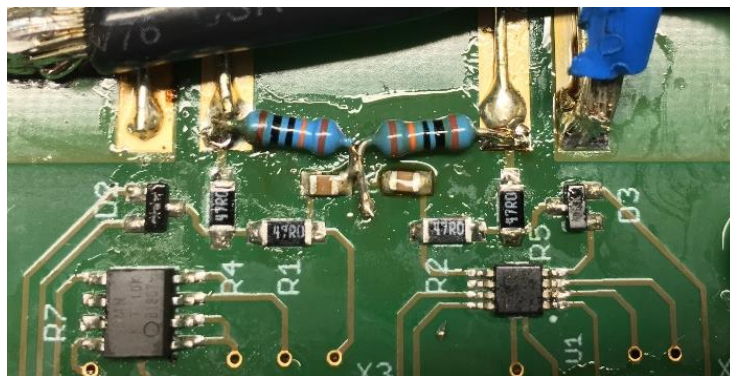
Graf vývoje napětí může být rozdělen do čtyř částí. V první cca polovině výstupní napětí přibližně odpovídá předpokládané úrovni, avšak je poměrně nestabilní. Následuje výrazně stabilnější úsek až do času přibližně 1500 s. V ten moment napětí skokově vyrostlo nad maximální měřitelnou hodnotu na daném rozsahu ($>2,5$ V). Po přibližně pěti minutách se opět vrátilo na stabilní hladinu 1,4 V, kde setrvalo přibližně jednu minutu. Následně postupně klesalo přibližně exponenciálně na 1,2 V.

Po skončení experimentu si bočník ponechal offset přibližně -200 mV. Po vypnutí proudu bylo tedy napětí na výstupu -200 mV místo očekávané nuly. Vypnutí napájecího napětí a následovně zapnutí nic nezměnilo. Ampérmetr si offset zachoval pro všechny vyzkoušené proudy, včetně obrácené polarity.

Měření DMM ukázalo napětí mezi neinvertujícími piny OZ 0 V. Napětí na předřadných rezistorech bylo také 0 V. Z toho vyplývá, že jimi netekl žádný proud. Napětí mezi vstupními piny OZ a plovoucí zemí ukázal multimetr opakovaně přibližně 5 V. Po přepnutí do režimu ampérmetru a připojení mezi vstupní část obvodu a plovoucí zem neukázal žádný proud a offset bočníku zmizel. Po odpojení se offset zase objevil a DMM v režimu voltmetru ukazoval opět přibližně 5 V, přičemž vždy po připojení voltmetru se offset snížil asi na polovinu.

Z toho vyplývá, že napětí je velmi měkké, zkratový proud je pro obyčejný bateriový ampérmetr neměřitelný a zatížení voltmetrem (s vnitřním odporem $10\text{ M}\Omega$) napětí výrazně sníží. Pravděpodobné vysvětlení tedy je, že během doby, kdy bylo výstupní napětí nad měřitelnou úrovní, se z neznámého důvodu částečně přetížila minimálně jedna z diod BAV199 a mírně změnila svodový proud v závěrném směru, tím pádem dvojice diod přestala být v rovnováze a tím stahovala napětí vstupní části obvodu k napájecímu napětí. Tím se OZ dostaly do situace, kdy měly na vstupu prakticky napájecí napětí, což znemožnilo jejich správnou funkci.

Tato hypotéza byla potvrzena výměnou diod BAV199 a ověřením opětovné správné funkčnosti. Pro zabránění opakování podobného scénáře byl obvod doplněn o dva $100\text{ k}\Omega$ rezistory mezi měřící rezistor a plovoucí zem (obr. 26). Tato změna byla provedena i ve schématu a layoutu desky v EAGLE pro další verzi ampérmetru. Viz kapitola 9.3.



Obr. 26: Doplněné rezistory

8.8.2 Druhý test

Po úpravě z minulé kapitoly byl proveden druhý test. Teplotní komora byla nastavena na 20 °C, proud bočnickem 7 A. Celý systém byl před začátkem měření tepelně stabilizován, proud začal obvodem protékat v okamžiku spuštění testu, tudíž je z grafu (viz příloha 5) patrný proces tepelného ustalování systému.

Měření probíhalo po dobu jedné hodiny. Během této doby nedošlo k žádné nestandardní situaci jako tomu bylo v případě prvního testu.

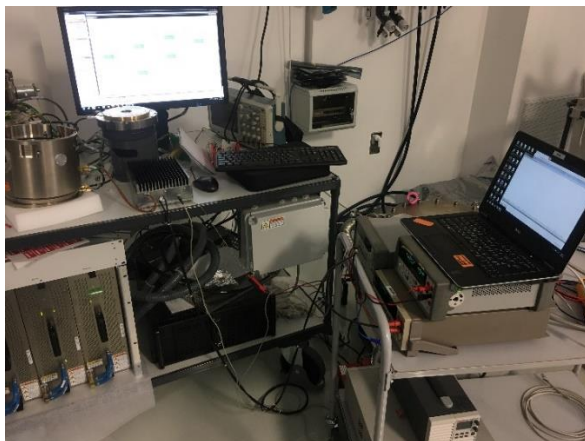
8.8.3 Třetí test

Poslední měření v tepelné komoře mělo za úkol zjistit reakci ampérmetru na změnu teploty okolí. Celý systém byl nejprve ustálen při protékajícím proudu 7 A při teplotě komory 5 °C. Následovalo plynulé oteplování komory na 30 °C po dobu 1,5 h ($\sim 0,28$ °C/min), poté půl hodiny komora udržovala teplotu 30 °C. Následovalo opětovné ochlazení komory na 5 °C po dobu jedné a půl hodiny. Třicet minut po dosažení minimální teploty bylo měření ukončeno. Grafy naměřených hodnot - viz příloha 5.

8.9 Testování v reálných podmínkách

Pro testování v reálných podmínkách byl použit systém virtuálního mikroskopu (počítačové simulace všech fyzických částí mikroskopu) s výjimkou zdrojů proudu a cívek elektronové optiky. Měřicí pracoviště je na obr. 27

Pro tyto účely bylo na měřeném ampérmetru zapotřebí několika úprav.



Obr. 27: Testovací systém

8.9.1 Úpravy pro testování v reálných podmínkách

V první řadě byly nahrazeny dočasné proudové vodiče dvoužilovým kabelem, který je pro propojení zdrojů a cívek v praxi používán. Jedna z žil byla přerušena a přes další kabely připájena k bočnicku.

Další úpravou je kryt celého zařízení. Jeho popis naleznete v kapitole 8.6.

8.9.2 Zhodnocení testů

Bylo provedeno několik testů při různých provozních proudech v obou polaritách. Výsledky ukázaly velmi výrazné zvýšení stability proti měření v teplotní komoře, avšak vždy po změně proudu trvalo teplotní ustálení téměř hodinu. Z toho důvodu je třeba zajistit aktivní teplotní stabilizaci přípravku. Viz kapitola 9.1.

Naměřené hodnoty nejsou stabilní v řádu jednotek μA , ale o dva až tři řády výše, v závislosti na teplotním ustálení ampérmetru. Z grafů jsou patrné dva jevy. Jeden z nich je přímá teplotní závislost. Tento jev by měl být do budoucna potlačen teplotní stabilizací popsanou v kapitole 9.1. Druhý je nemonotónnost v čase. Pro ověření zda není zdrojem tohoto šumu samotný měřený zdroj proudu, je třeba zjistit, zda se šum objeví i po připojení velmi přesného zdroje konstantního napětí na vstup zesilovače tak, že nahradí napěťový úbytek na měřicím rezistoru. Pro ověření stability měřeného proudu totiž nebyl použit žádný kalibrovaný přístroj a bylo spoléháno pouze na interní zpětnou vazbu zdroje proudu.

9. ZMĚNY A DOPLNĚNÍ PRO DALŠÍ VÝVOJ

Během měření hotového ampérmetru bylo zjištěno několik nedostatků, které je vhodné eliminovat do dalšího vývoje.

9.1 Teplotní stabilizace

Zásadním problémem je pouze pasivní chlazení bez jakékoli regulace teploty. To vyžaduje extrémně dlouhé časy pro ustálení teploty přípravku a nedokáže reagovat na změny okolní teploty. Důvod potřeby takové stabilizace je popsán v kapitole 6.

Pro teplotní stabilizaci je vhodné použít Peltierův článek s řídicím obvodem a zpětnovazebním teplotním senzorem.

Peltierův článek je nutno zvolit takový, který při požadovaném odváděném výkonu dokáže vytvořit dostatečný rozdíl teplot mezi teplou a studenou stranou. Takový článek je například MCHPE-128-10-05-E [28], který při odvodu 10 W tepla zvládne při maximálním výkonu rozdíl teplot až 80 °C. Což se jeví jako dostatečné pro udržení teploty fólie rezistoru pod hranicí 60 °C.

Obvod pro řízení výkonu Peltierova článku může být například MAX1979ETM+, který umí využít zpětnovazební termistory jak PTC tak i NTC. Na výstupu má výkonové MOSFETy, a jeho interní zesilovače jsou modulační, takže je u nich potlačeno offsetové napětí. Tím pádem je schopen teplotu regulovat velmi přesně.

Další varianta může být použití digitální regulace PID za použití nějakého mikrokontroléru.

Při výběru vhodného chladiče na teplou stranu Peltierova je nunto dbát na velké odpadní teplo vyprodukované Peltierovým článkem při chlazení, které je potřeba odvádět současně s teplem vyprodukovaným na měřícím rezistoru. U navrženého Peltierova článku je výkon odpadního tepla až 170 W.

Z grafů v datasheetu byly vypsány rozdíly teplot při odvádění tepla 10 W při různých proudech Peltierovým článkem a také odpadní teplo které článek vyprodukuje. Následně byla výpočtem odhadnuta teplota fólie rezistoru při použití různých chladičů. Náhled je v tab. 1.

Tab. 1: Výpočet teploty rezistoru

				Rheatsink - tepelný odpor chladič [K/W]									
				0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	
I [A]	ΔT [°C]	Pwaste [W]											
				T - Teplota fólie rezistoru [°C]									
0	0	0		80	85	90	95	100	105	110	115	120	
1,8	25	20		65	80	95	110	125	140	155	170	185	
2,5	37	30		58	78	98	118	138	158	178	198	218	
4	55	50		50	80	110	140	170	200	230	260	290	
5,5	67	80		53	98	143	188	233	278	323	368	413	
7	75	110		60	120	180	240	300	360	420	480	540	
9	80	170		85	175	265	355	445	535	625	715	805	
Tambient		Vzorec pro výpočet											
40 °C		T = (Pshunt+Pwaste)*Rheatsink+Pshunt*Rshunt-ΔTpeltier+Tambient											
Pshunt		Rshunt											
10 W		3,5 K/W											

Z této tabulky jasně vyplývá, že s chladičem, který by měl tepelný odpor 1,5 K/W nebo větší by použití Peltierova článku teplotu rezistoru zvýšilo, místo snížilo. Chladič použitý v současnosti tuto podmínku splňuje.

9.2 Regulace napětí sekundární strany NMS1209

Protože měnič napětí NMS1209 nemá stabilizovaný výstup (viz kapitola 8.7) je vhodné jeho výstup stabilizovat. Použité operační zesilovače mají PSRR 142 dB, avšak ani to nestačí potlačit kolísání mezi 9 a 13 V pod úroveň jednotek nV.

Regulátory napětí potřebují pro správnou funkci na vstupu napětí o několik jednotek voltů větší než na výstupu, jako vhodné se jeví použití stabilizátoru na 5 V. Snížení napájecího napětí OZ není problém, protože největší uvažované výstupní napětí OZ je ± 2 V.

Nové schéma a layout desky zdroje plovoucího napětí - viz příloha 7.

9.3 Doplnění rezistoru na desku bočníku

Při prvním testu v teplotní komoře (kapitola 8.8.1) se projevila chyba v návrhu desky bočníku. Byly sice použity diody BAV 199, které udržovaly potenciál plovoucího napětí v okolí potenciálu měřicího rezistoru, avšak nezajistily nulový CMV do operačních zesilovačů. Pro tento účel byly doplněny dva 100 k Ω odpory mezi měřicí rezistor a plovoucí zem. Hodnota rezistorů je dostatečně vysoká, aby nezkreslila měření, avšak vodivost je dostačující pro zajištění této podmínky.

Nové schéma a layout desky bočníku - viz příloha 8.

9.4 Doplnění integračního filtru na výstup

Pro snížení šumu vstupujícího do měřicího voltmetru lze použít integrační filtr. K realizaci takového filtru poslouží přidaný kondenzátor. Ten bude umístěn co nejbližší konektorům voltmetru, zapojený mezi jádra koaxiálních kabelů vedoucích z bočníku do voltmetru. Tento kondenzátor bude společně s výstupním odporem celého bočníku tvořit RC filtr.

Výstupní odpor OPA2188 je přibližně $0,1 - 100 \Omega$ (v závislosti na frekvenci). Při frekvenci přibližně 100 Hz je právě z řádu desetin ohmu. Proto jako výstupní odpor můžeme uvažovat odpory mezi OZ a BNC konektory – tedy přibližně 100Ω . Pro dosažení filtru s mezní frekvencí v řádu 100 Hz použijeme kondenzátor s kapacitou přibližně $10 \mu\text{F}$. Vhodný typ je například keramický, protože na výstupech mohou být obě polarity napětí.

10. ZÁVĚR

V této práci jsem se věnoval přesnosti měření a nejistotám, metodám měření proudu a vlastnostem operačních zesilovačů. Stejně tak i způsobům zapojení operačních zesilovačů a technologiím jako je modulace a automatické nulování. Zaměřil jsem se na přesné měření a metody pro dosahování vysokých přesností. Věnoval jsem se také vlivu teploty na elektronické součástky, zejména na operační zesilovače a rezistory, metodám měření teploty, odvodu tepla pomocí Peltierova článku a P, PI a PID regulaci.

Navrhnul jsem různé možnosti zapojení zařízení pro měření stability proudu a pomocí simulace v PSPice jsem provedl citlivostní analýzy pro různé případy. Vybral jsem vhodné součástky pro sestavení tohoto zařízení, přičemž jsem zohledňoval nutnost měření s co možná nejlepší přesností. Vybral jsem rezistor o velmi nízkém teplotním koeficientu odporu.

Navrhnul jsem obvodové zapojení bočníku a zdroje plovoucího napětí v programu EAGLE. Vytvořil jsem layout dvou desek plošných spojů, které jsem následně objednal firmy Gatema a.s. Tyto desky jsem následně osadil zakoupenými součástkami. Obstaral jsem potřebnou kabeláž.

Celý přípravek jsem mechanicky umístil na masivní hliníkový chladič a vytvořil kryt z plechu. Kryt jsem z vnitřní strany potáhnul mirelonem.

Provedl jsem sérii měření v tepelné komoře a na systému virtuálního mikroskopu, zhodnotil naměřená data a navrhnul postup pro další vývoj přípravku.

Literatura

- [1] Rogowski coil. *Wikipedie* [online]. [cit. 2018-10-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Rogowski_coil
- [2] A Current Sensing Tutorial: Fundamentals. *Eetimes* [online]. **2012**, 1 [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279404&page_number=1
- [3] Vidlákovo Elektro: Proudové zdroje. *Nekorektní blog Petra Kubáče* [online]. [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: <http://petr-kubac.blog.cz/1304/vidlakovo-elektro-36-proudove-zdroje-2>
- [4] Operační zesilovač. *Wikipedia* [online]. [cit. 2018-10-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Operační_zesilovač
- [5] *Texas Instrument: low-side measurements disadvantage* [online]. [cit. 2018-10-16]. Dostupné z: <https://e2e.ti.com/support/amplifiers/f/14/t/512238?low-side-measurements-disadvantage>
- [6] A Current Sensing Tutorial: Devices. *Eetimes* [online]. **2012**, 2 [cit. 2018-10-20]. Dostupné z: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279415
- [7] HUDGINS, Dennis. Low-Side Current Sense Circuit Integration: Current Sensing Products. *TechNotes* [online]. **2017**, 3 [cit. 2018-10-22]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sboa190/sboa190.pdf>
- [8] High-Side Current-Sense Measurement: Circuits and Principles. *Maxim Integrated* [online]. 2001 [cit. 2018-10-26]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/746>
- [9] TUIE, Don. *What's The Difference Between High-Side And Low-Side Current Sensing?* [online]. **2012** [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/power/what-s-difference-between-high-side-and-low-side-current-sensing>
- [10] SPECIFIER, Electronic. *Current sensing: low side, high side and zero drift* [online]. In: . [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=7BH8GHSeVo0>
- [11] *SHUNTS, CURRENT SHUNTS, AND CURRENT-SENSING RESISTORS: Resistive Products* [online]. In: . 2018, s. 17 [cit. 2018-11-02]. Dostupné z: http://www.vishay.com/docs/49159/_power-metal-strip-shunts-current-shunts_pl0005-1801.pdf
- [12] Shunt resistor Read more <http://www.resistorguide.com/shunt-resistor/>. *Resistorguide* [online]. 2018 [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: <http://www.resistorguide.com/shunt-resistor/>

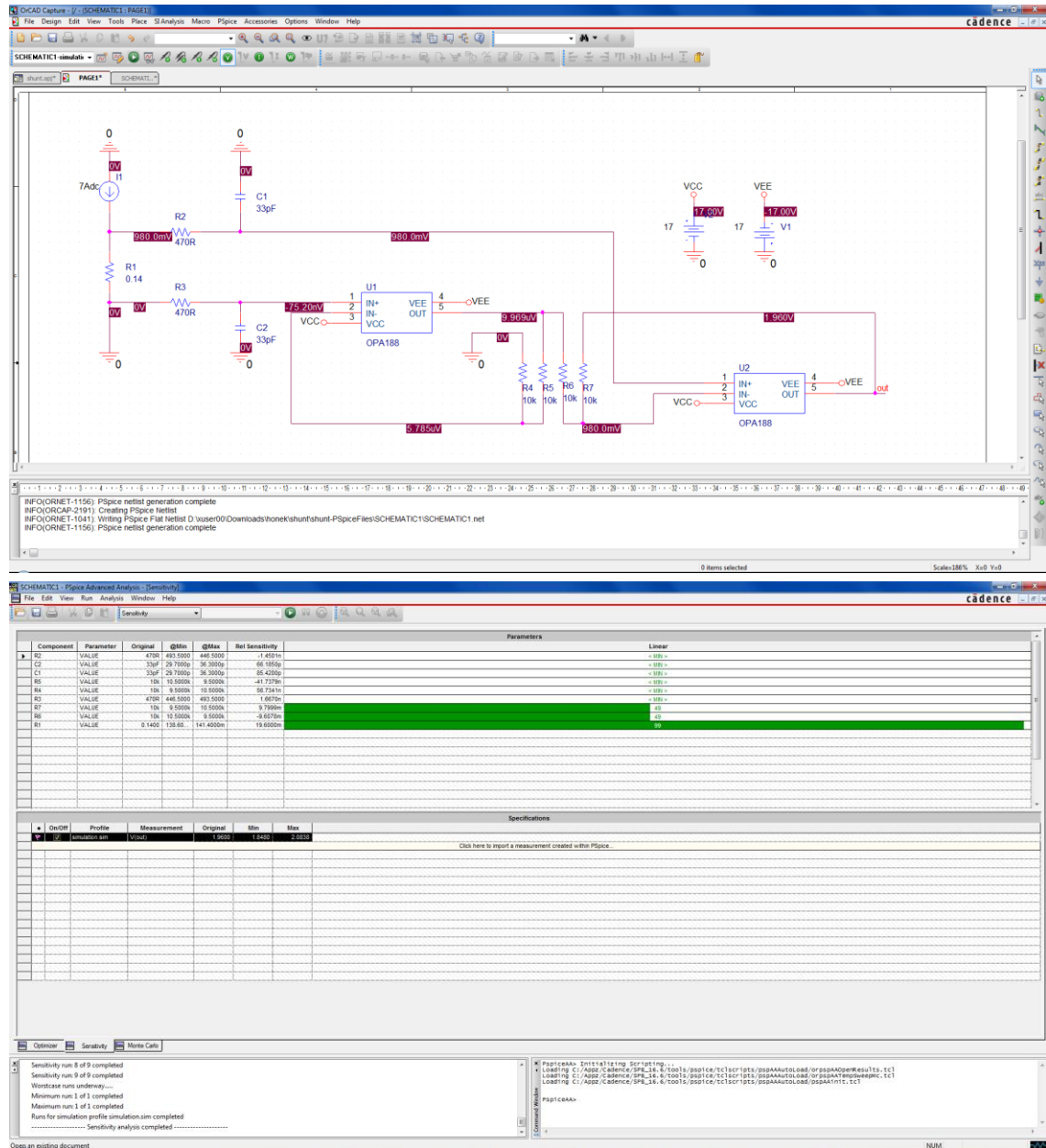
- [13] BARTUŠEK, Karel, Eva GESCHEIDTOVÁ, Jiří REZ, Miloslav STEINBAUER, Radek KUBÁSEK a Jan MIKULKA. *Měření v elektrotechnice* [online]. 2010 [cit. 2018-11-06]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/mod/url/view.php?id=147387>
- [14] BRADÍK, Josef. *Metodika vyjadřování nejistoty měření* [online]. [cit. 2018-11-08]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02011/index.html>
- [15] Parts per million. *Wikipedie* [online]. 2017 [cit. 2018-11-08]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Parts_per_million
- [16] YOSHINORI, Kusuda. *Reducing Switching Artifacts in Chopper Amplifiers* [online]. **2018**, 209 [cit. 2018-11-10]. DOI: 10.4233. Dostupné z: https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:62585ae8-da35-459e-bf90-f53f7d0de32c/datastream/OBJ/downloadhttps://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279451&page_number=1
- [17] A Current Sensing Tutorial: Accuracy. *Eetimes* [online]. **2012**, 2 [cit. 2018-10-10]. Dostupné z: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279451&page_number=2
- [18] TEMES, Gabor C. *AUTOZEROING AND CORRELATED DOUBLE SAMPLING TECHNIQUES* [online]. Oregon state University [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4757-2462-2_3
- [19] KLEPÁRNÍK, Jan. *Termočlánky* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_tcl.htm
- [20] Temperature Sensors. *Electronics tutorials* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_3.html
- [21] Peltierův článek. *Wikipedie* [online]. 2018 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Peltierův_článek
- [22] P, PI and PID control. *Ao tera* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://www.ao-tera.com.ua/list/us/technology/0/246.html>
- [23] Data Sheet AD8676. In: *Analog* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8676.pdf>
- [24] Data Sheet OPA2188. In: *Texas Instruments* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2188.pdf>
- [25] Datasheet SPR 4-T220 T221. *Vishaypg* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: http://www.vishaypg.com/docs/64255/64255_SPR_4_T220_T221.pdf

- [26] Datasheet Y1365V0008QT9R. *Mouser* [online]. [cit. 2018-12-10].
Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/428/63001-4478.pdf>
- [27] USR 4-3425 0R100 D 1%. *Newark.com* [online]. [cit. 2019-04-28].
Dostupné z: https://www.newark.com/powertron/usr-4-3425-0r100-d-1/res-metal-foil-0r1-1-30w-sip/dp/91Y1734?scope=partnumberlookahead&ost=USR+4-3425+0R100+D+1%25&searchref=searchlookahead&exaMfpn=true&ddkey=https%3Aen-US%2FElement14_US%2Fw%2Fsearch
- [28] MCHPE-128-10-05-E. *Farnell.com* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: MCHPE-128-10-05-E
- [29] Rezistor VISHAY. In: *Amazon.com* [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/414bK5oAoLL._SX342_.jpg
- [30] Peltierův článek. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2018-08-19].
Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/data/E_vznik_proudu_termojevy/image038.jpg
- [31] CHRÁST, J. Návrh a realizace symetrických převodníků U/I a I/U . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Jeřábek. Strana 11.
- [32] Měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti látek. *E-konstrukter* [online]. 2017 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/merna-tepelna-kapacita-soucinitel-tepelne-vodivosti-latek>

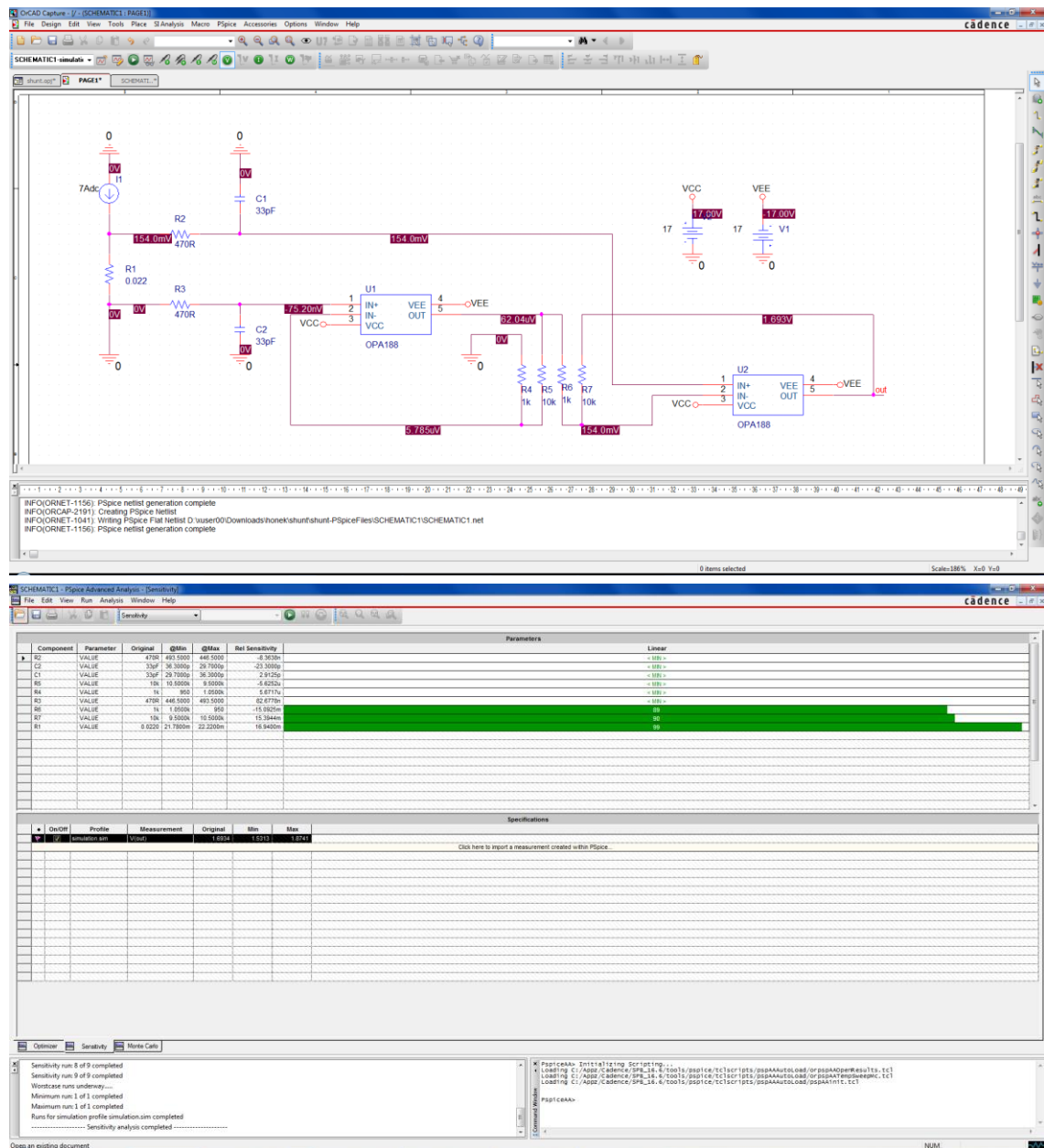
Seznam příloh

Příloha 1 - Citlivostní analýza pro $R=0,14\Omega$; $A=2$	54
Příloha 2 - Citlivostní analýza pro $R=0,022\Omega$; $A=11$	55
Příloha 3 - Citlivostní analýza pro $R=0,2\Omega$; $A=10$	56
Příloha 4 - Výkres chladiče	57
Příloha 5 - Testy v tepelné komoře – grafy naměřených hodnot	58
Příloha 6 - Test v reálných podmínkách.....	59
Příloha 7 - Nový návrh desky napájení	62
Příloha 8 - Nový návrh desky bočníku.....	63
Příloha 9 - Seznam součástek.....	64

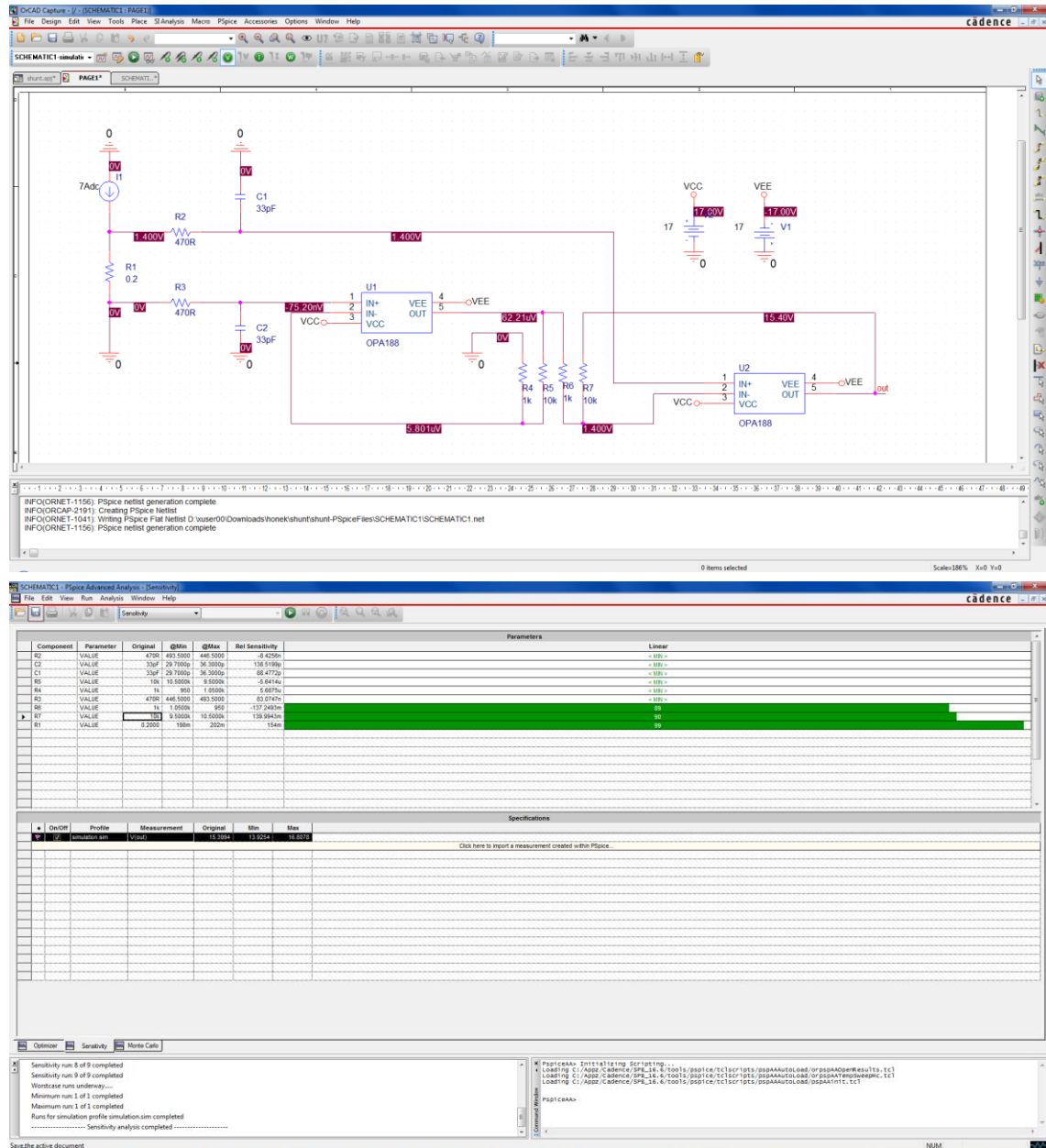
Příloha 1 - Citlivostní analýza pro $R=0,14\Omega$; $A=2$



Příloha 2 - Citlivostní analýza pro $R=0,022\Omega$; $A=11$

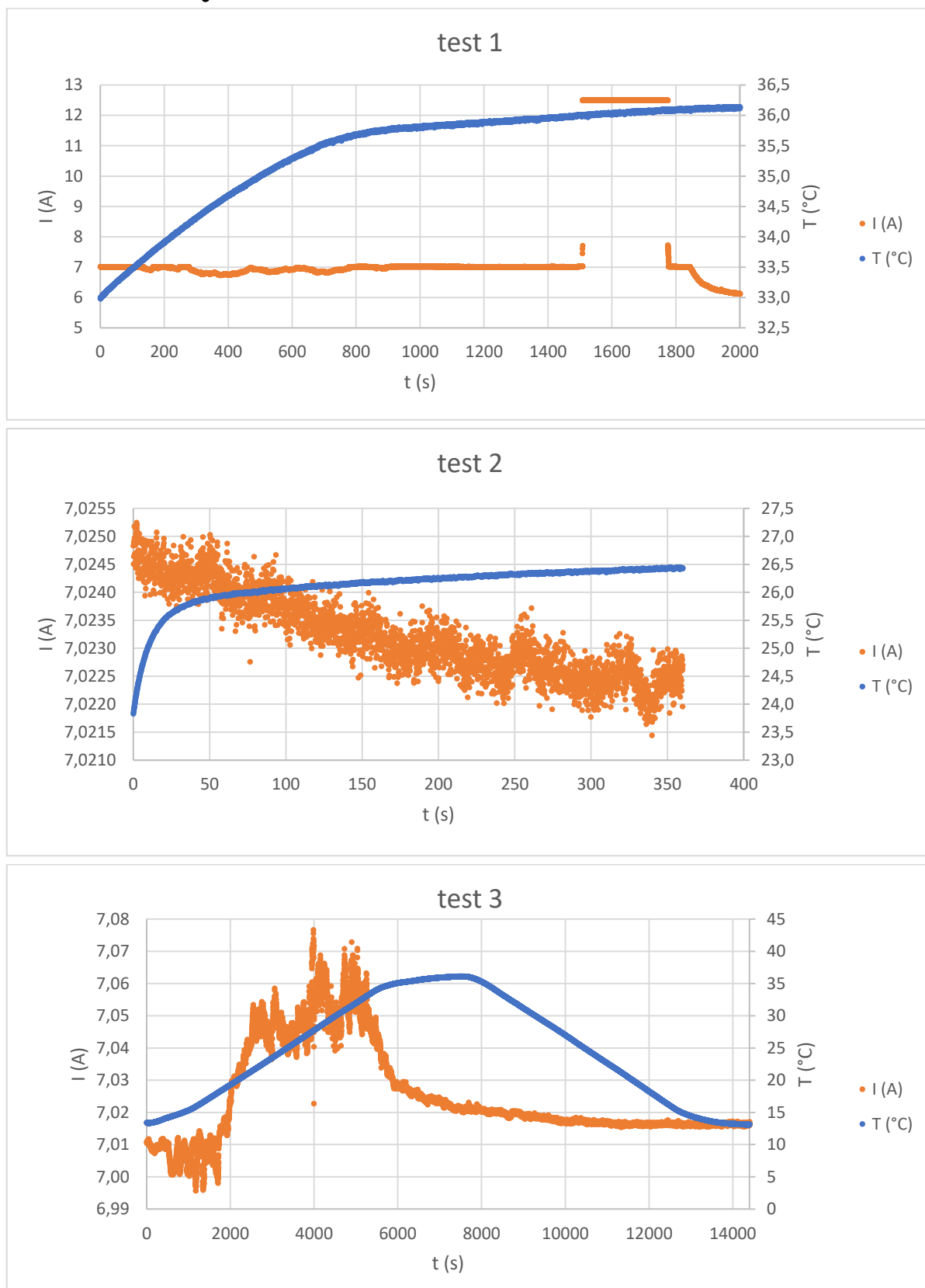


Příloha 3 - Citlivostní analýza pro $R=0,2\Omega$; $A=10$

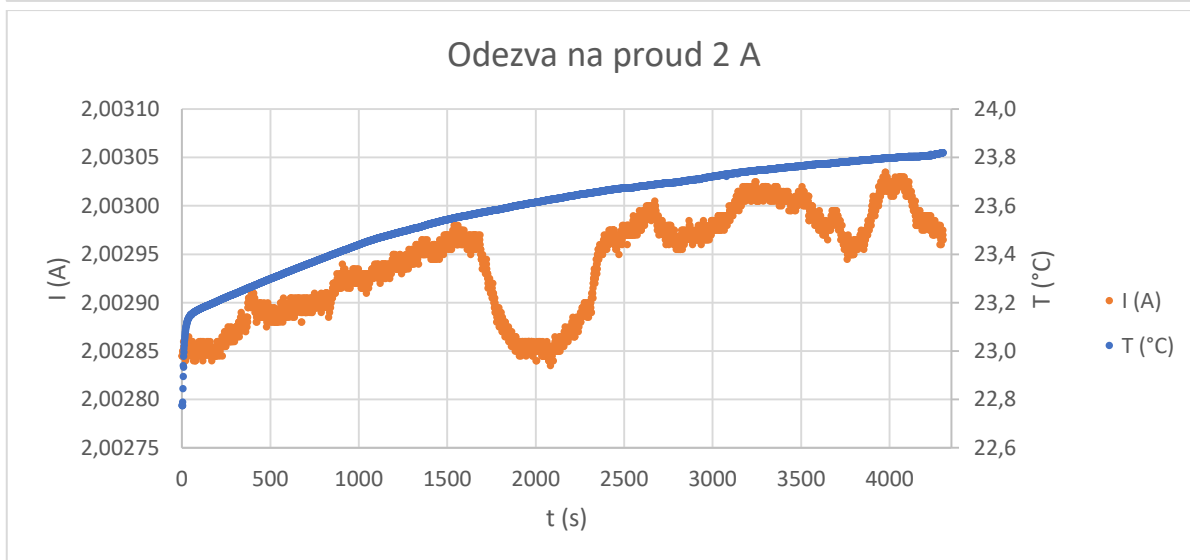
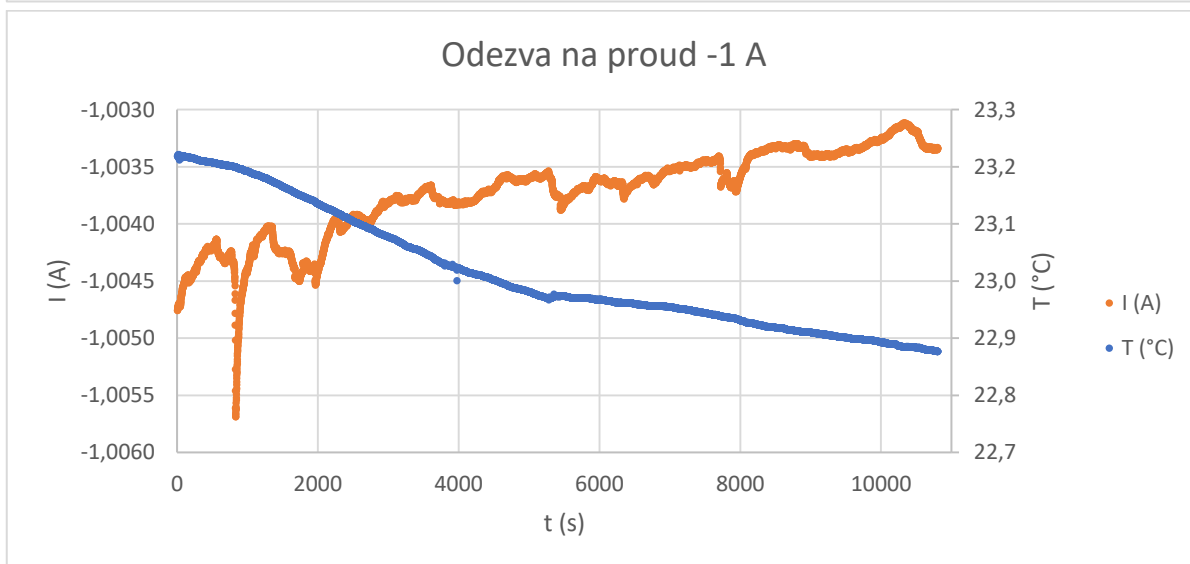
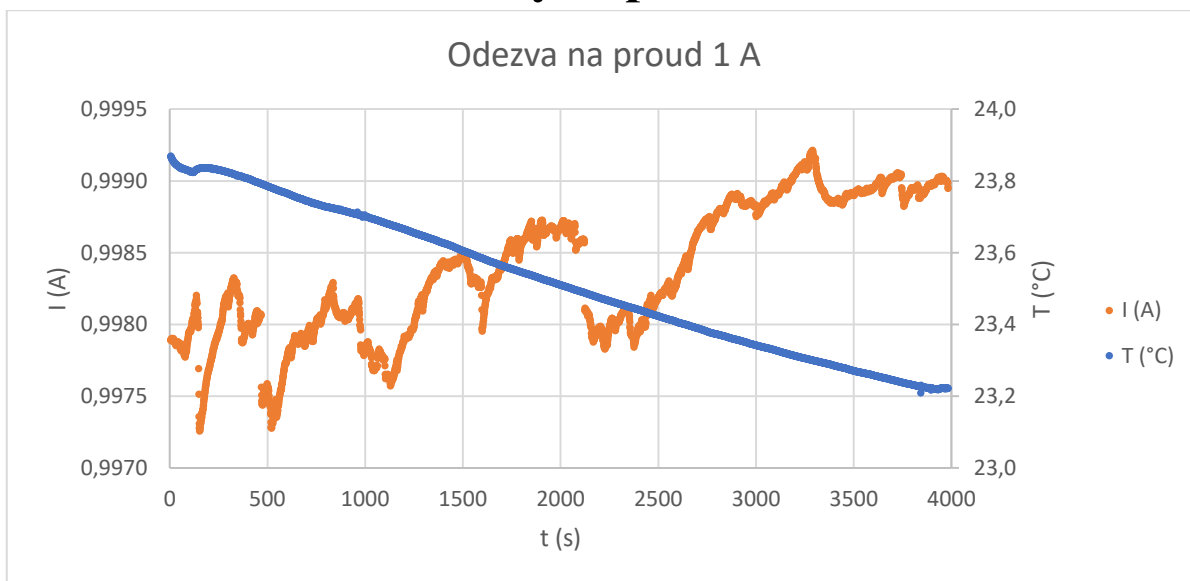


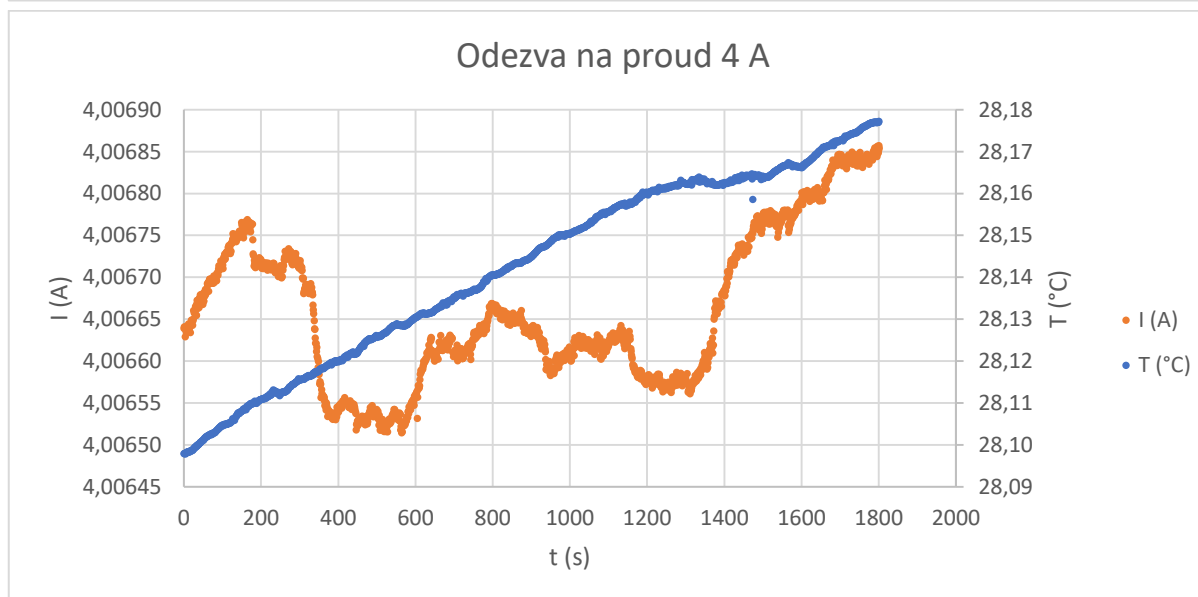
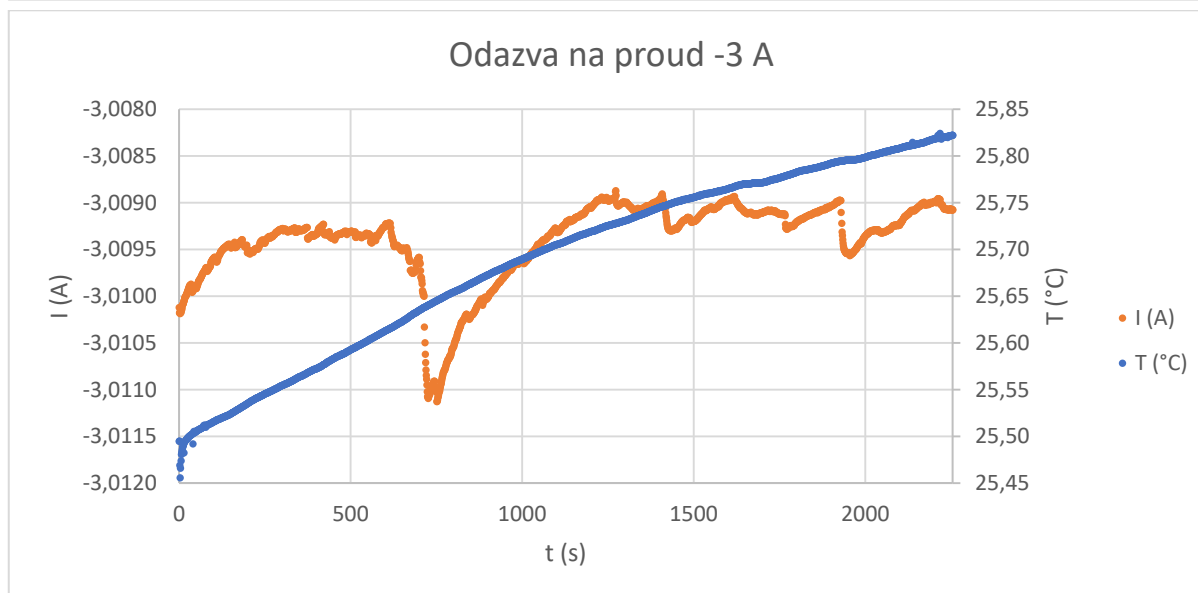
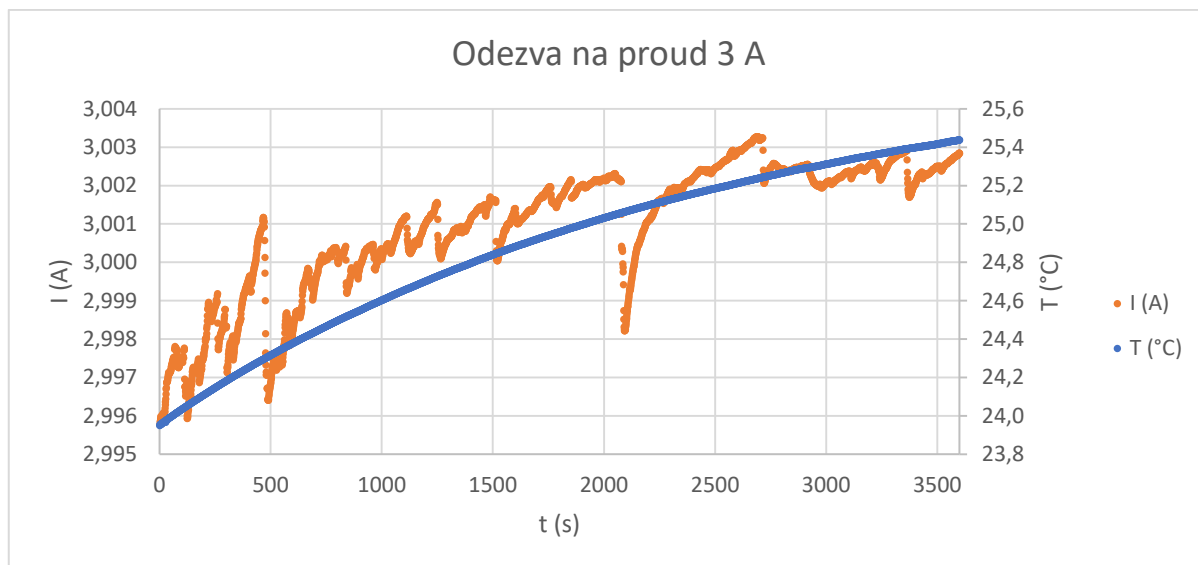
The drawing is the property of the Library and is loaned to the Library for use in the study of the drawing. The drawing is not to be reproduced or published in any form or by any means without the written consent of the Library. The drawing is not to be used for any other purpose without the written consent of the Library.

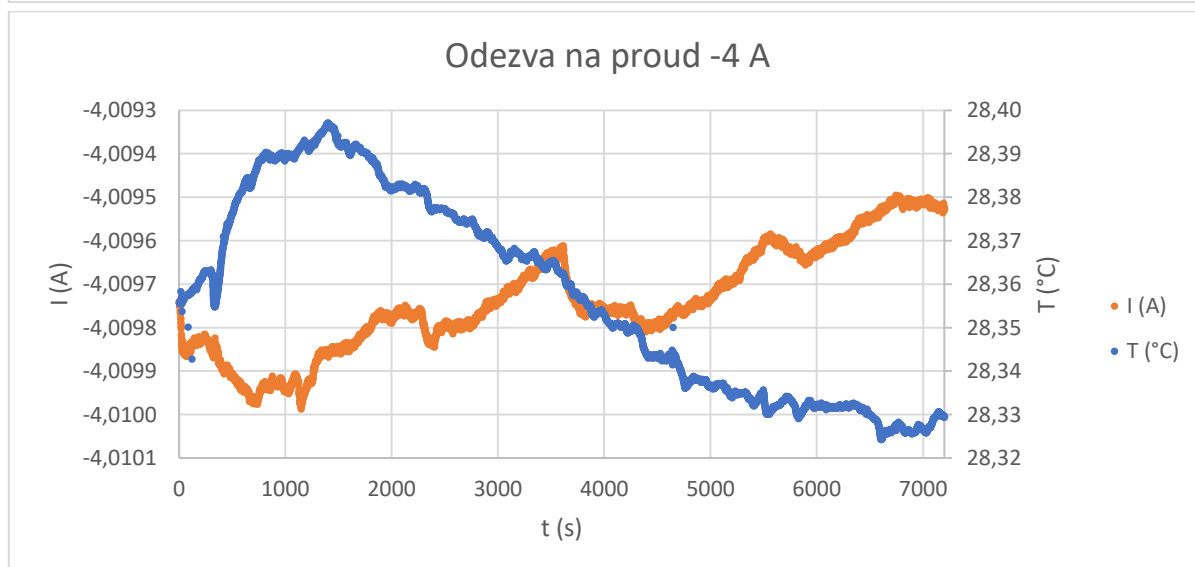
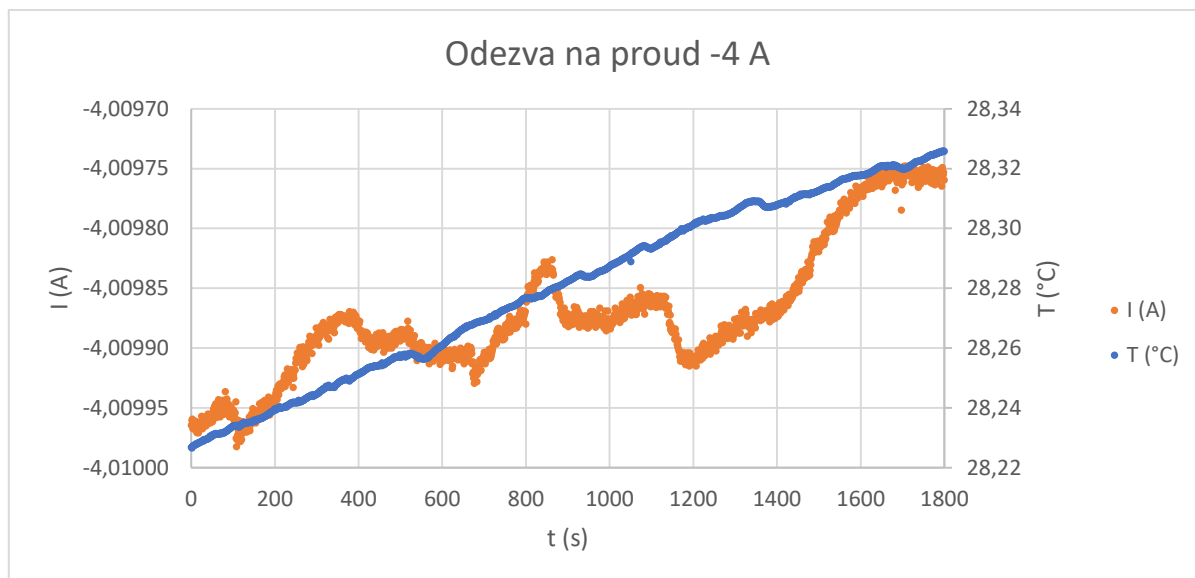
Příloha 5 - Testy v tepelné komoře – grafy naměřených hodnot



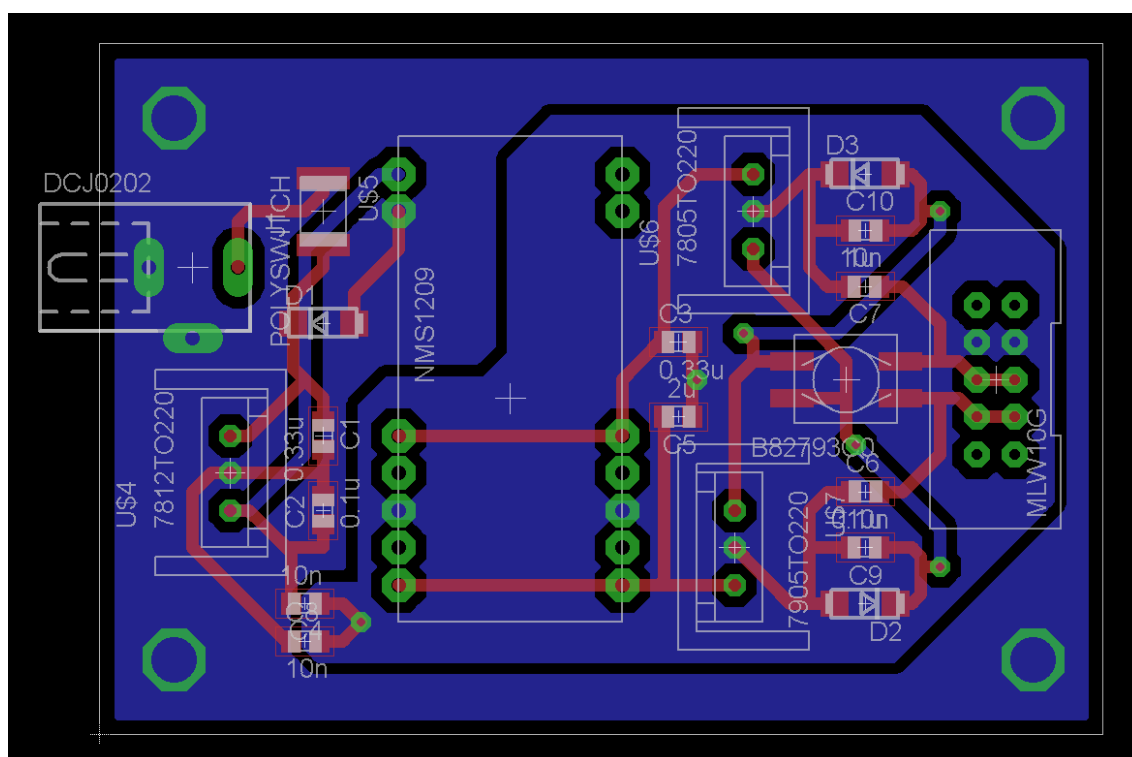
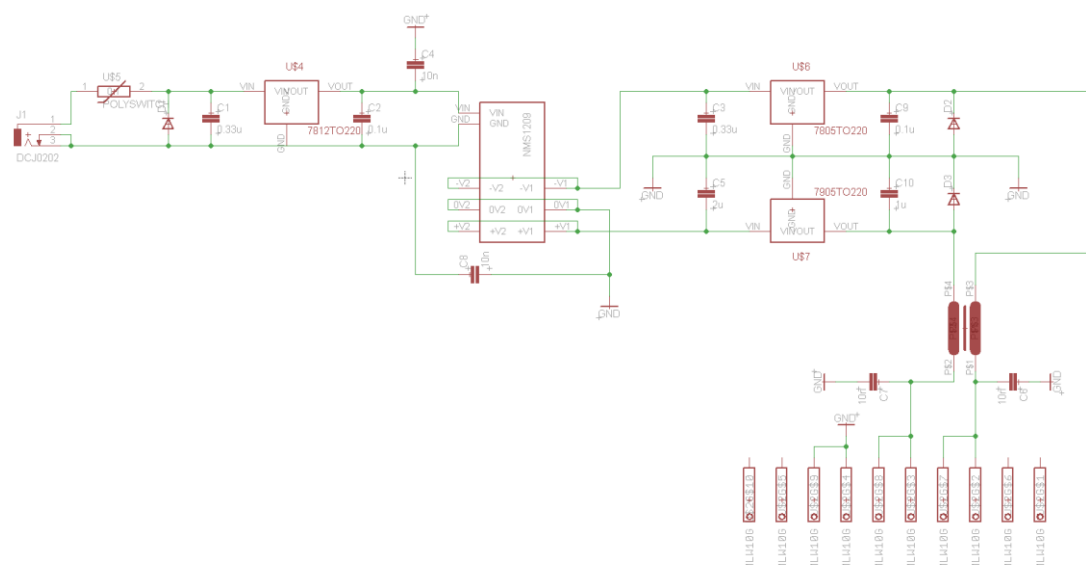
Příloha 6 - Test v reálných podmínkách



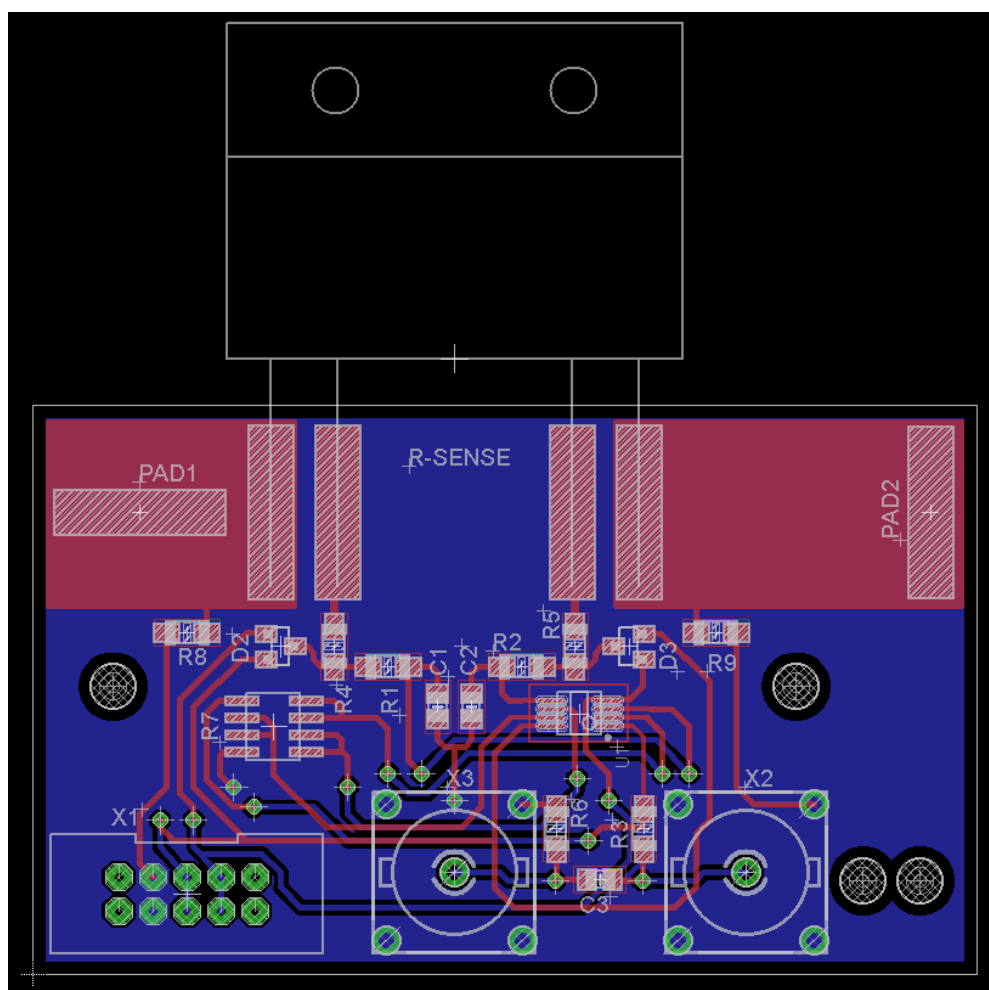
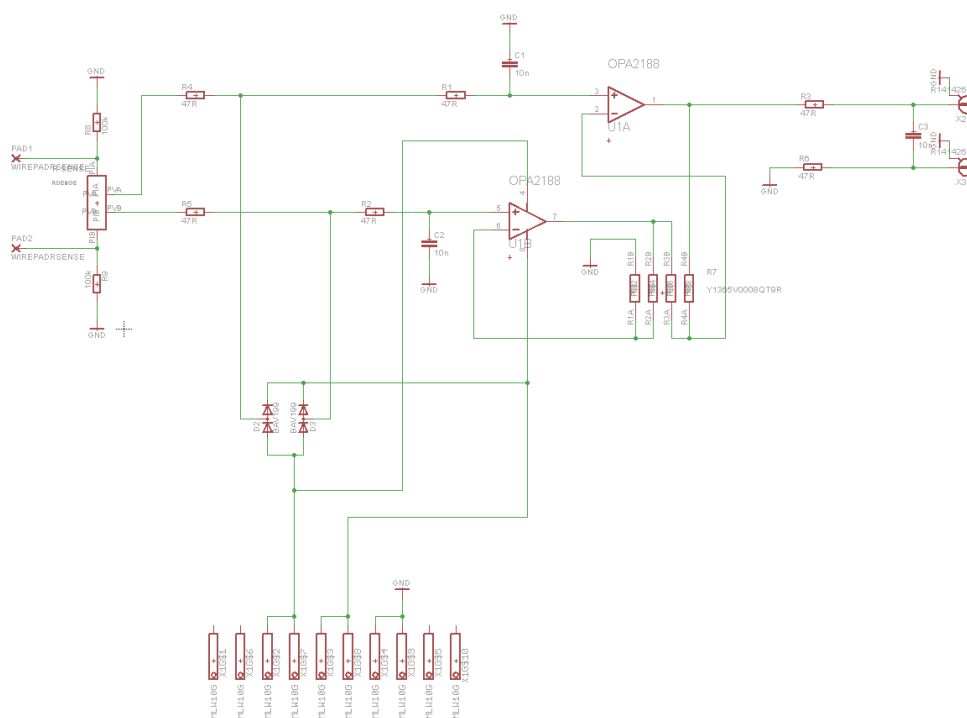




Příloha 7 - Nový návrh desky napájení



Příloha 8 - Nový návrh desky bočníku



Příloha 9 - Seznam součástí

číslo dílu	Popis	Jednotková cena	Cena celkem	Množství	Jednotková cena	Cena celkem
1	1Y365000 VISHAY FOIL RESISTORS Resistorové Sít, 10 kohm, 5MM Series, 10 kohm, 4 Prvků, Izolovaný, SMD	2 280,38 Kč	4 560,77 Kč	2	2 280,38 Kč	4 560,77 Kč
2	09A12384 TEXAS INSTRUMENTS Operční Zesilovač, 2 MHz, 0,8 V/Us, AV až 36V, MSOP, 8 Pinů	81,66 Kč	163,32 Kč	2	81,66 Kč	163,32 Kč
3	4 USA-4342 POWERTRON Resistor Skrz Desku, 0,1 ohm, USR 4-3425 Series, 30 W, ± 1%, SIP, 750 V	1 688,46 Kč	3 376,92 Kč	2	1 688,46 Kč	3 376,92 Kč
4	5 C0805340 KEMET SMD Vlečkový Keramický Kondenzátor, 10000 pF, 100 V, 0805 [2012 Metric], ± 1%, COG / NPO	59,58 Kč	1 191,56 Kč	20	59,58 Kč	1 191,56 Kč
6	CR03W1206 VISHAY SMD Čipový Resistor, Tlustý Film, 1206 [3215 Metric], 47 ohm, Série CROW, 200 V, Thick Film	0,94 Kč	18,84 Kč	20	0,94 Kč	18,84 Kč
7	88793500 EKPOS Tumiňka, Souhlasný Režim, 51 µH, B8279350 Série, 800 mA, 7,1mm x 6mm x 4,9mm	72,42 Kč	144,84 Kč	2	72,42 Kč	144,84 Kč
8	1-1479305 GREENPAR - TE CONNECTIVITY RF / Koaxiální Konektor, BNC Koaxiální, Pravoúhlý Jack, Pájecí, 50 ohm, Mosaz	177,45 Kč	354,90 Kč	2	177,45 Kč	354,90 Kč
9	81-1479305 GREENPAR - TE CONNECTIVITY RF / Koaxiální Konektor, BNC Koaxiální, Pravoúhlý Jack, Pájecí, 50 ohm, Mosaz	177,45 Kč	354,90 Kč	2	177,45 Kč	354,90 Kč
9	98055334 AVX SMD Vlečkový Keramický Kondenzátor, 0,33 µF, 50 V, 0805 [2012 Metric], ± 10%, X7R	13,35 Kč	66,77 Kč	5	13,35 Kč	66,77 Kč
10	98055310 AVX SMD Vlečkový Keramický Kondenzátor, FLEXITEMP®, 0,1 µF, 100 V, 0805 [2012 Metric], ± 10%, X7R	6,09 Kč	30,45 Kč	5	6,09 Kč	30,45 Kč
Kód produktu						
1	971-034 Vratná polistka SMD RME014E SMD 1812	2,59 Kč	8 Kč	3	2,59 Kč	8 Kč
2	971-035 Vratná polistka SMD RME020E SMD 1812	4,20 Kč	13 Kč	3	4,20 Kč	13 Kč
3	620-052 V71102	9,90 Kč	30 Kč	3	9,90 Kč	30 Kč
4	621-039 GL330 T0220 0,1mm	1,50 Kč	5 Kč	3	1,50 Kč	5 Kč
5	330-005 Stabilizátor pevného napětí STMicrollectronics 7812CVDG STM	9 Kč	27 Kč	3	9 Kč	27 Kč
6	917-016 Dioda 1N4007 DO-214AC	3,90 Kč	12 Kč	3	3,90 Kč	12 Kč
7	800-007 Konektor PFL10	6,30 Kč	19 Kč	3	6,30 Kč	19 Kč
8	800-035 Konektor MLW10G	5,30 Kč	16 Kč	3	5,30 Kč	16 Kč
9	806-312 Napájecí souosý konektor PC-GK2.1	5,60 Kč	17 Kč	3	5,60 Kč	17 Kč
10	806-016 Napájecí souosý konektor DCI SGP-2009B	12 Kč	36 Kč	3	12 Kč	36 Kč
Celkem		9,934 35 Kč			Celkem	9,934 35 Kč